



**Ana Filipa Saraiva
das Neves**

Novos compósitos abrasivos de matriz vítrea



**Ana Filipa Saraiva
das Neves**

Novos compósitos abrasivos de matriz vítrea

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva, Professor Associado do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, e do Doutor Filipe José Alves de Oliveira, Investigador Auxiliar do CICECO.

o júri

presidente

Prof. Dr. Joaquim Manuel Vieira
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. José Manuel Ramos Gomes
professor associado da Universidade do Minho

Prof. Dr. Rui Ramos Ferreira e Silva
professor associado da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Silva, por toda a disponibilidade, incentivo e apoio manifestado.

Ao meu co-orientador, Doutor Filipe Oliveira, por toda a “paciência”, pela ajuda laboratorial e pelas críticas “sempre” construtivas...

À empresa Dragão Abrasivos pela disponibilidade demonstrada na realização deste trabalho. Um especial obrigado ao Engenheiro Luís Carvalho e ao Engenheiro Correia Júnior.

A todos os colegas (amigos) do laboratório que me incentivaram e com quem tive o privilégio de trabalhar e conviver. Um enorme obrigado!

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, da Universidade de Aveiro, a minha gratidão pela ajuda e dedicação.

A todos os Amigos, por o terem sido. O vosso apoio foi crucial, principalmente em momentos decisivos.

À minha família por toda a compreensão e incondicional apoio.

À minha mãe pelo carinho, encorajamento e constante motivação. Obrigado pelo teu sorriso!

Ao Nuno que me ajuda a não olhar para trás e que torna a vida muito mais preenchida. Assim vale a pena...

palavras-chave

abrasivos, alumina, matriz vítrea, mó, diagrama ternário.

resumo

O objectivo do presente trabalho é o desenvolvimento de novos abrasivos rígidos de matriz vítrea, com temperaturas mais baixas de cozedura, aglomerando partículas abrasivas de alumina.

As partículas de alumina são ligadas por uma matriz vítrea que se obtém a partir de uma mistura de materiais naturais – argila, quartzo e feldspato – e uma frita comercial. A mistura das partículas de alumina e da matriz vítrea é submetida a um processo de sinterização reactiva com temperaturas da ordem dos 1200°C – 1300°C, resultando um produto maioritariamente amorfo e parcialmente poroso. A principal função da matriz vítrea é manter o grão abrasivo sempre actuante durante a maquinagem, mas deve também libertar as partículas abrasivas já desgastadas, a uma taxa controlada.

Através da variação da composição e da percentagem em peso das matérias-primas obtêm-se diferentes tipos de mós abrasivas para diversas funções.

Neste trabalho utilizou-se o diagrama ternário $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ para se estudar as matrizes convencionais e simular as novas formulações. Várias técnicas de caracterização foram utilizadas para o estudo das matrizes e abrasivos vitrificados convencionais – DRX, ATD, ATG, SEM, FRX, análise granulométrica, análise dilatométrica, velocidade de ruptura, resistência à compressão, resistência à flexão, choque térmico, módulo de Young. As técnicas anteriormente descritas forneceram informações importantes para a caracterização química, térmica, microestrutural e mecânica das matrizes vítreas e respectivos abrasivos vitrificados.

Os ensaios demonstraram que um dos tipos de abrasivo vitrificado, designado por AA, apresenta as melhores propriedades mecânicas, estando estas relacionadas directamente com a composição da matriz e com a composição em fases da matriz vítrea após sinterização. Projectaram-se ainda novas composições de matrizes vítreas com temperaturas mais baixas de cozedura e melhores propriedades mecânicas.

keywords

abrasives, alumina, vitrified matrix, grinding wheels, ternary plot.

abstract

The goal of the present work is the development of the new vitrified grinding wheels, with low sintering temperatures with alumina particles.

The alumina abrasive particles are bonded by a vitreous matrix obtained from a mixture of common raw materials – clay, quartz, feldspar – and a commercial ground glass frit. The mixture of the alumina particles and the vitrified matrix is submitted to a reactive sintering process in the temperature range of 1200°C - 1300°C, leading to a mostly amorphous and partially porous material. The main function of the vitreous matrix is the holding of the abrasive grains, but, during the grinding operation, it may also provide the releasing of the worn particles at a controlled rate.

Through the variation of the composition and the weight proportion of the raw materials, different grinding wheels are obtained for each kind of process.

Ternary plots - $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ - are used in the present work to study the conventional matrices and to propose new compositions. Several characterization techniques were employed for the study of conventional matrices and vitrified abrasives: XRD, ATD, ATG, SEM, XRF, granulometric analyses, dilatometric analyses, rupture speed, compressive strength, flexural strength, thermal shock, Young's modulus. The techniques earlier described led to important information on the chemical, thermal, microstructural and mechanical properties of the vitrified matrices and vitrified abrasives.

Tests show that one of the vitrified abrasive grades, here labelled as AA, presents the best mechanical properties, being directly related with the matrix composition and the phasic composition of the vitrified matrix. However, new vitrified matrices compositions were projected with lower sintering temperatures and better mechanical properties.

Índice

Introdução	1
Capítulo I. Elementos Bibliográficos	5
1. Evolução das ferramentas abrasivas	7
2. Abrasivos rígidos de matriz vítrea	8
2.1. Matriz ligante	8
2.1.1. Tipo de matrizes	9
2.1.2. Matrizes vítreas	10
2.2. Materiais abrasivos	14
2.2.1. Classificação e propriedades	14
2.2.2. Materiais abrasivos sintéticos	16
2.3. Estrutura/ Porosidade	17
2.4. Dureza	17
3. Processo de fabricação das mós abrasivas vitrificadas	18
3.1. Armazenamento das matérias-primas/ Mistura	19
3.2. Prensagem/ secagem	19
3.3. Ciclo de cozedura	19
3.4. Acabamento/ controle final	21
4. Aplicações	22
Capítulo II. Metodologia Experimental	25
1. Abrasivos vitrificados seleccionados	27
2. Técnicas de caracterização	29
2.1. Matérias-primas	29
2.1.1. Espectrometria fluorescência de raios – X (FRX)	29
2.1.2. Difracção de raios – X (DRX)	29
2.1.3. Análise granulométrica	30
2.2. Matrizes vítreas	30
2.2.1. Difracção de raios – X (DRX)	30
2.2.2. Análise dilatométrica	30
2.3. Abrasivos vitrificados	30

2.3.1. Densidade/absorção de água/porosidade	30
2.3.2. Retracção Linear	32
2.3.3. Microscopia electrónica de varrimento (SEM)	32
2.3.4. Características mecânicas	32
Capítulo III. Resultados e Discussão	37
1. Matérias-primas	39
1.1. Composição química	39
1.2. Composição cristalográfica	40
1.3. Análise granulométrica	42
2. Matriz vítrea	43
2.1. Composição cristalográfica	43
2.2. Composição química	45
2.3. Análise dilatométrica	48
3. Abrasivos vitrificados	49
3.1. Densidades/ Absorção de água/ Porosidade	49
3.2. Retracção Linear	50
3.3. Microestrutura	51
3.4. Ensaio mecânicos	52
Capítulo IV. Projecto de Novas Matrizes	61
Capítulo V. Conclusões	67
1. Conclusões	69
2. Trabalho futuro	70
Bibliografia	71

Introdução

O mercado dos produtos abrasivos engloba duas grandes classes: os abrasivos rígidos, compreendendo as mós e os discos de corte; e os abrasivos flexíveis, de que fazem parte as lixas. Os abrasivos rígidos são constituídos por grãos abrasivos duros ligados por uma matriz de natureza resinóide, metálica ou vítrea. Os abrasivos rígidos de grãos de alumina com matriz vítrea constituem o presente tema de trabalho.

Os abrasivos rígidos estiveram sempre ligados ao desenvolvimento industrial e, em particular, a partir da Revolução Industrial os progressos foram muito rápidos. A competitividade nos sectores da indústria que envolvem tecnologias de maquinagem com abrasivos rígidos tem vindo a impor um esforço de inovação no sector das máquinas e ferramentas, que alia aumentos da produtividade a saltos significativos na qualidade. Mais recentemente, o crescimento da indústria automóvel tornou-se um dos grandes propulsores do desenvolvimento destes produtos, principalmente devido às tolerâncias dimensionais apertadas exigidas por este sector industrial [1].

O emprego das matrizes vítreas em alternativa às resinóides ou metálicas carece ainda de um estudo aprofundado no que diz respeito às condições de processamento, aplicação e operação, estando disponível um número muito reduzido de artigos científicos sobre este tema [2-6]. A estes soma-se alguma informação técnica por parte dos fabricantes [7-10], cujo conhecimento tem, no entanto, um carácter fortemente empírico, herança de várias gerações de operadores. A formação industrial nesta área dos abrasivos requer um longo período de aprendizagem, uma vez que as matérias-primas apresentam uma grande variabilidade de composições e características físicas, tornando-se necessário planear inúmeras condições de fabrico, e a gama de produtos é extremamente vasta, o que implica grande versatilidade na produção.

Foi este o ponto de partida para o trabalho aqui proposto, desenvolvido a partir de uma solicitação da empresa Dragão Abrasivos Lda, pioneira em Portugal na produção de abrasivos rígidos. Em particular, no que diz respeito às matrizes ligantes de natureza vítrea, a Dragão Abrasivos considera de primordial importância a investigação de novas composições, mais complexas e de propriedades termomecânicas acrescidas, visando um aumento da velocidade de corte e capacidade de retenção dos grãos abrasivos, garante de uma maior vida útil da ferramenta.

Com este objectivo, dois temas constituíram as etapas essenciais deste trabalho: i) caracterização das matrizes vítreas convencionais e respectivos compósitos abrasivos vitrificados; ii) projecto de novas formulações de matrizes vítreas para serem usadas como aglomerantes de grãos abrasivos de alumina.

Este trabalho compreende 5 capítulos, organizados e distribuídos da forma a seguir apresentada. No Capítulo 1 – elementos bibliográficos – abordam-se os aspectos mais relevantes para o entendimento desta matéria. No Capítulo 2 – metodologia experimental – referem-se os materiais seleccionados e descrevem-se as técnicas de caracterização utilizadas. No Capítulo 3 – resultados e discussão – apresentam-se e analisam-se os

resultados obtidos nos diversos ensaios. No Capítulo 4 – projecto de novas matrizes – projectam-se novas formulações de matrizes vítreas a partir das composições e das propriedades térmicas e mecânicas estudadas anteriormente. No Capítulo 5 – conclusões – enumeram-se as principais conclusões, bem como algumas sugestões de trabalhos futuros no domínio da temática abordada.

Capítulo I. Elementos Bibliográficos

Neste capítulo faz-se o enquadramento histórico sobre a evolução das ferramentas abrasivas; apresentam-se as considerações teóricas sobre os abrasivos rígidos de matriz vítreas; referem-se as principais etapas do processo de fabrico das mós abrasivas vitrificadas; mencionam-se as principais aplicações.

1. Evolução das ferramentas abrasivas

Abrasivos são materiais que são usados para polir ou limpar superfícies ou simplesmente para remover material, para alterar a forma de uma superfície ou as suas dimensões [11]. Esta acção de desgaste, de forma a modificar uma peça, pertence ao instinto do Homem primitivo. Nesta época, o Homem afiava as ferramentas com a ajuda de uma pedra. Há 4.000 anos a.C. já era usado pelos egípcios um processo de corte de grandes blocos de pedra, semelhante ao que é usado hoje no corte de blocos de granito com fios de aço e pó de diamante [1].

Fazer uma relação cronológica completa sobre os descobrimentos e evolução do uso dos abrasivos, seria um pouco difícil. De uma forma geral, os factos mais importantes ocorridos desde o século XVI foram [1]:

- 1500 – Máquina de afiar ferramentas que utilizava uma mó de pedra trabalhada à mão;
- 1825 – Primeiras mós de diamante ligadas com lacre (índia);
- 1837 – Gaudin (francês) obteve os primeiros cristais de alumina;
- 1850 – Primeiras mós com liga mineral;
- 1857 – Primeiras mós ligadas com borracha;
- 1860 – Primeira máquina de rectificação cilíndrica (Brown – Sharp);
- 1864 – Primeiras mós com liga cerâmica (Inglaterra);
- 1877 – Frémy e Fiel obtiveram grãos de alumina para serem usados como abrasivos;
- 1891 – Moissan (francês) e Acheson (norte-americano) obtiveram, ao mesmo tempo, durante pesquisas para obter o diamante artificial, o SiC – carboneto de silício;
- 1893 – Primeiras mós de carboneto de silício.

A partir da Revolução Industrial os progressos foram muito rápidos. Em 1927 apareceram as primeiras mós fabricadas com resinas sintéticas como matriz ligante.

Novos abrasivos surgiram nos últimos anos. Em 1934 apareceu o carboneto de boro. Em 1957 surgiu no mercado o diamante sintético produzido pela General Electric Co. (EUA) e mais tarde, em 1959, foi produzido pela primeira vez o nitreto de boro cúbico (CBN). No início da década de 70 surgiram os abrasivos de alumina – zircónia e mais recentemente surgiu um cerâmico abrasivo de alumina produzido pelo método sol – gel que foi desenvolvido nos EUA, tratando-se de um cerâmico de elevada pureza [11,12].

2. Abrasivos rígidos de matriz vítrea

Os abrasivos rígidos de matriz vítrea (mós abrasivas vitrificadas), objecto deste trabalho, apresentam um enorme campo de aplicação, sendo os mais indicados para operações de acabamento, rectificação de produtos com arestas vivas e operações de precisão [7]. A figura I.1 apresenta uma fotografia representativa de mós abrasivas vitrificadas.



Figura I.1. Fotografia representativa de mós abrasivas vitrificadas.

Para a utilização deste tipo de mós devem ser considerados quatro elementos fundamentais [8]:

- Matriz ligante – material que liga os grãos abrasivos;
- Material abrasivo – material que compõe os grãos da mó;
- Porosidade – porosidade da mó abrasiva;
- Dureza – resistência grão abrasivo/ matriz ligante.

2.1. Matriz ligante

A matriz de uma ferramenta abrasiva, cuja principal função é a de manter o grão abrasivo sempre actuante durante a maquinagem, desempenha outros papéis: sustenta as partículas abrasivas e permite a montagem do compósito abrasivo em corpos de sustentação convenientes, por métodos diversos como a brazagem, colagem, sinterização, electrodeposição, etc. No entanto, a matriz ligante deve também libertar as partículas abrasivas já desgastadas, a uma taxa controlada. As matrizes podem ser divididas em três grandes grupos [2,6,12]: i) resinóides; ii) metálicas; iii) vítreas. A escolha adequada do tipo de matriz ligante a ser utilizada na aplicação determina o desempenho da ferramenta

abrasiva [5]. A selecção do tipo de matriz ligante nos produtos abrasivos depende dos seguintes factores: material a ser rectificado, tipo de operação e precisão pretendida [8].

O tipo e a quantidade de matriz ligante são ajustados, dependendo do processo de rectificação correspondente.

2.1.1. Tipo de matrizes

Um estudo comparativo entre os três tipos de matrizes mais usadas mostra o seguinte [2,6,12]:

- Resinóides: mais flexíveis que as vítreas e as metálicas; difíceis de limpar; apresentam baixa condutividade térmica; fáceis de processar; possibilitam a maquinagem de uma gama alargada de materiais; no caso da impregnação de diamante ou CBN, as partículas têm de ser recobertas com níquel ou outro material inorgânico para contrariar a elevada capacidade de extracção de calor por parte do diamante ou do CBN, garantindo assim melhor protecção térmica à matriz.
- Metálicas: grande resistência ao desgaste; difíceis de limpar; boas propriedades térmicas, mas, ao mesmo tempo, com maiores perdas de calor por atrito; maior recobrimento das partículas abrasivas e conseqüente menor eficiência de corte, implicando a utilização de cargas elevadas; no caso das electrodepositadas têm a vantagem de serem facilmente fabricadas pelo utilizador, apesar da vida ser limitada dada a menor espessura de material cortante.
- Vítreas: têm um módulo elástico mais próximo do diamante que os outros tipos de matrizes; permitem a rectificação de produtos com arestas vivas; mantêm o perfil de corte por mais tempo, sendo mais utilizadas para operações de precisão; são fáceis de limpar; processamento mais difícil que as resinóides; apresentam excelentes características térmicas, nomeadamente o baixo coeficiente de expansão térmica; dado serem possíveis de fabricar com uma porosidade selectiva, podem absorver mais ou menos impacto, suportar maiores ou menores cargas, permitindo a maquinagem desde materiais duros a tenazes; a porosidade reduz ainda perdas de calor por atrito e permite maior manutenção dos líquidos de refrigeração; são excelentes para aplicação em metais dada a incompatibilidade química matriz vítrea/ metal; são inertes aos fluidos refrigerantes; devem ser utilizadas evitando condições em que se evidencie choque térmico e impacto considerável.

As matrizes vítreas constituem o presente tema de estudo. A primeira patente de matriz vítrea é de 1864 [2], no entanto, o emprego destas matrizes em alternativa às resinóides ou metálicas carece ainda de um estudo aprofundado no que diz respeito às condições de processamento, aplicação e operação.

2.1.2. Matrizes vítreas

Existem poucos estudos de mós abrasivas vitrificadas na literatura. Jackson et al. [5]. referiram que o desempenho das mós vitrificadas depende da composição da matriz ligante que controla dois factores importantes: coeficiente de expansão térmica e durabilidade química. A situação ideal é o coeficiente de expansão térmica da matriz ligante e do grão abrasivo serem os mesmos, a menos de uma ordem de grandeza, para se obter uma boa adesão. A compatibilidade térmica evita tensões interfaciais quando a mó arrefece na fase final de cozedura. A durabilidade química contra soluções aquosas é também um factor importante e é dependente da composição química.

O coeficiente de expansão térmica tem sido investigado para uma variedade de matrizes vítreas. Na tabela I.1 apresentam-se alguns resultados baseados em valores publicados por Jackson et al. [3].

Tabela I.1. Valores de coeficiente de expansão térmica para diferentes matrizes vítreas [3].

Matriz vítrea	Óxidos (% peso)						Coeficiente de expansão térmica ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	
A	22,67	63,14	6,19	1,66	0,1	0,11	$4,9 \times 10^{-6}$
B	16,00	72,82	5,85	1,63	0,07	0,08	$4,4 \times 10^{-6}$
C	17,14	69,64	6,95	1,95	0,08	0,05	$4,6 \times 10^{-6}$
D	21,14	64,04	8,14	2,27	0,10	0,10	$5,4 \times 10^{-6}$
E	19,47	66,46	8,05	2,27	0,09	0,09	$5,0 \times 10^{-6}$
F	19,54	65,70	9,06	2,58	0,09	0,10	$5,6 \times 10^{-6}$

Este tipo de matrizes são obtidas a partir de materiais naturais – argila, quartzo e feldspato – e uma frita comercial, os quais, após mistura dão origem à matriz ligante.

Argilas

A complexidade e variabilidade das argilas deve-se à variação qualitativa e quantitativa dos minerais argilosos e dos minerais não argilosos respectivos e à variação da distribuição dimensional das partículas minerais que as formam [13].

As argilas são utilizadas no fabrico de produtos cerâmicos em vários sectores da Industria Cerâmica. São abundantes em Portugal, situando-se os depósitos particularmente nas orlas sedimentares do País. Do ponto de vista geológico os depósitos das argilas têm estrutura tabular ou lenticular e são de origem marinha, lagunar, lacustre ou fluvial. Do ponto de vista composicional, podem conter quartzo, feldspato, mica (moscovite e biotite), óxidos e hidróxidos de ferro (hematite, lepidocrocite e goethite), pirite, carbonatos (calcite e dolomite), caulinite, illite, montmorilonite, clorite, siderite, gesso e matéria orgânica [13].

O caulino é uma argila especial de cor branca ou quase branca, cor que melhora após secagem e cozedura. Do ponto de vista de génese pode ser residual ou sedimentar e no que respeita à composição os minerais principais da fracção argilosa são a caulinite e a caulinite + halosite; e os minerais principais da fracção não argilosa são o quartzo, as micas e os feldspatos [11,13].

A maioria das aplicações da argila situa-se no sector da cerâmica, onde as propriedades relevantes da argila são a sua plasticidade quando húmida, o endurecimento após cozedura [11], a formação de fase vítrea a temperatura mais baixa e o aumento da dureza do corpo cerâmico.

Quartzo

O quartzo é uma matéria-prima de baixo custo, que apresenta elevada dureza (grau 7 da escala de Mohs) e é o segundo mineral mais abundante na crosta terrestre, apresentando como composição química o SiO_2 [11,13]. A estrutura do quartzo é formada por átomos de Si em coordenação com 4 átomos de oxigénio, sendo o tetraedro SiO_4 a unidade básica da estrutura do quartzo e dos outros polimorfos da sílica, tais como cristobalite e tridimite. Cada oxigénio de um tetraedro está ligado a oxigénios de tetraedros vizinhos, mas a geometria das ligações varia de polimorfo para polimorfo [11,13].

As transformações da sílica cristalina durante o aquecimento são acompanhadas por dilatação – contracção térmica. A temperatura de inversão para o quartzo puro, isto é, a transformação quartzo α (trigonal) para quartzo β (hexagonal) verifica-se a 573 °C à pressão

normal. As temperaturas correspondentes a outras transformações polimórficas, podem observar-se na figura I.2 [11].

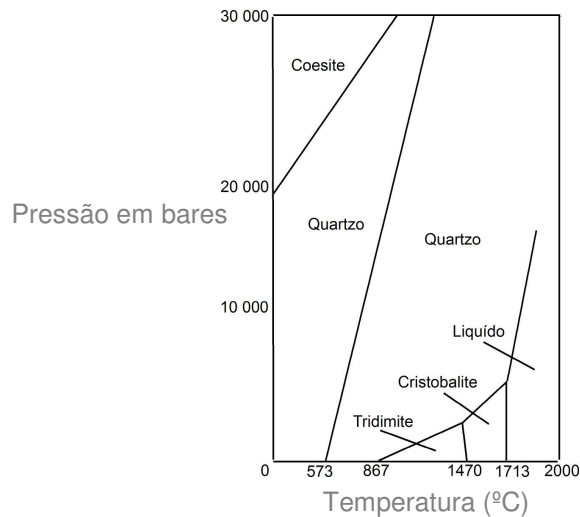


Figura I.2. Diagrama P-T da sílica [11].

O quartzo tem várias funções nos produtos cerâmicos, actuando como carga, como agente refractário e ainda, como sucede no caso dos vidros, como formador principal [13].

Feldspatos

Os feldspatos constituem um importante grupo de minerais formadores de rocha e são de grande interesse para a indústria cerâmica. Podem apresentar cor branca, amarela, verde, azul, cinzenta ou preta. Possuem densidade situada entre 2,54 – 2,64 g/cm³ e dureza (escala de Mohs) entre 6 – 7 [11].

Quimicamente os feldspatos são aluminossilicatos de K, Na e Ca. Constituem cerca de 60% das rochas da crosta terrestre mas, só uma pequena parte pode ser usada na indústria cerâmica uma vez que a maioria dos feldspatos ocorre em grão fino a médio, com separação mecânica impraticável dos minerais com eles associados, muitas vezes portadores de ferro. Normalmente, quanto maior for o conteúdo de Ca do feldspato, maior é a probabilidade de estar associado a minerais ferríferos. Por esta razão só os feldspatos alcalinos, isto é, os feldspatos sódico – potássicos são utilizados na indústria cerâmica [11,13].

De acordo com as respectivas características cristaloquímicas, os feldspatos pertencem, tal como o quartzo, ao grupo dos tectossilicatos, o que significa que são constituídos por uma rede ou armação tridimensional de tetraedros de sílica, SiO_4 , onde entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ de átomos de Si podem ser substituídos por Al e todos os oxigénios dum tetraedro estão ligados a oxigénios dos tetraedros vizinhos. A deficiência de carga eléctrica resultante da substituição isomórfica de Si por Al é compensada pela introdução de átomos de Na, K e Ca, na estrutura em cavidades existentes entre as cadeias de grupos SiO_4 . O Si e o Al têm coordenação 4, enquanto o Na, o K e o Ca têm coordenação 8 [13].

O teor elevado em alcalis dos feldspatos é a causa da fusão fácil e consequente reactividade dos feldspatos com os outros componentes dos corpos cerâmicos, quando cozidos. O feldspato – K funde acima de 1150°C , enquanto que o feldspato – Na funde a temperatura inferior a 1118°C . A viscosidade da fusão do feldspato – K é maior do que a do feldspato – Na. Esta diferença explica a razão porque o feldspato – K é usado principalmente em corpos cerâmicos, enquanto que o feldspato – Na é usado principalmente em vidros. A tabela I.2 apresenta a composição ideal dos feldspatos – K, Na [13].

Tabela I.2. Composição ideal dos feldspatos – K, Na (% peso) [13].

	<i>Feldspato – K</i>	<i>Feldspato – Na</i>
SiO_2	64,7	68,8
Al_2O_3	18,4	19,4
K_2O	16,9	--
Na_2O	--	11,8

A utilização dos feldspatos na indústria cerâmica deve-se principalmente à sua acção fundente ou de fluxo. Um fluxo cerâmico é uma substância que adicionada ao corpo cerâmico permite a formação duma fase líquida a temperatura mais baixa. Ao arrefecer, a fase líquida transforma-se em vidro que liga o grão formador do corpo cerâmico de modo a conferir-lhe a desejada resistência mecânica [11,13]. O feldspato diminui a densidade do corpo cerâmico quando este é queimado abaixo de 1100°C (por aumentar a sua porosidade) mas, acima de 1100°C o feldspato funde e contribui para aumentar a densidade do corpo cerâmico [13].

O feldspato – K reduz a contracção térmica, enquanto que o feldspato – Na reduz a expansão térmica. O feldspato – K origina vidro de maior viscosidade, maior resistência mecânica e maior transparência em comparação com o feldspato – Na [13]. Por vezes,

utiliza-se uma combinação destes dois tipos de feldspato como forma de baixar o ponto de fusão [11].

Fritas

As fritas são materiais de natureza vítrea, preparadas por fusão, a temperaturas elevadas e a partir de uma mistura de matérias-primas de natureza cristalina. Durante o processo de fabricação, a referida mistura forma uma massa fundida que, no final do processo, é arrefecida instantaneamente em água, originando a frita propriamente dita [14].

Os constituintes da frita podem ser divididos em duas categorias: formadores de rede (SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3) e modificadores de rede (Na_2O , K_2O , CaO e MgO) [10].

As principais propriedades físicas da frita são a viscosidade e o coeficiente de expansão térmica [10].

A razão fundamental para a utilização de fritas neste tipo de ferramentas abrasivas é reduzir a temperatura e/ ou tempo de cozedura, promover a ligação grão abrasivo/ matriz vítrea e aumentar a resistência mecânica.

Em resumo, o conhecimento das características físico-químicas da matriz ligante e o seu comportamento mecânico é indispensável para a fabricação das mós abrasivas.

2.2. Materiais abrasivos

Para o desenvolvimento das mós abrasivas vitrificadas a matriz ligante é incorporada ao material abrasivo (grão abrasivo).

2.2.1 Classificação e propriedades

Materiais abrasivos naturais são aqueles que se encontram na natureza, tais como o diamante, o topázio, o quartzo e o feldspato. Os abrasivos sintéticos são obtidos por meio de processos industriais, de que são exemplo o óxido de alumínio (alumina), o carboneto de silício, o nitreto de boro cúbico (CBN) e o diamante [1].

As características físicas ou propriedades mais importantes dos materiais abrasivos são a sua dureza, a tenacidade/ friabilidade, e a forma e dimensão do grão [1,7].

A figura I.3 apresenta os valores de dureza de alguns materiais abrasivos na escala de dureza Knoop. Esta escala é a mais utilizada a nível industrial para medir a dureza dos materiais abrasivos [10].

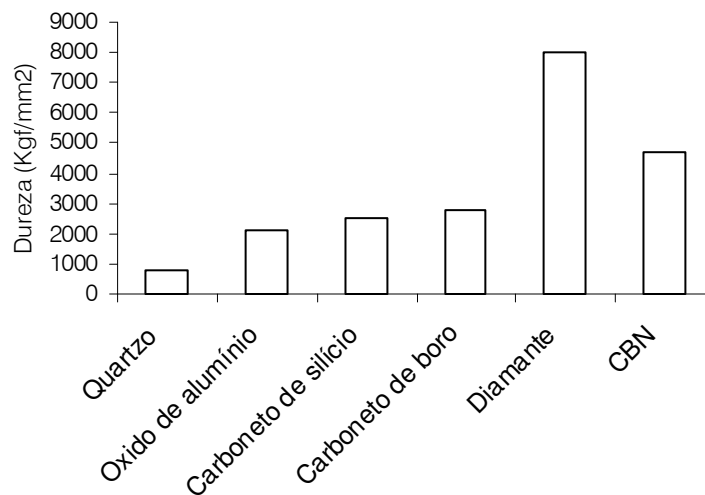


Figura I.3. Valores de dureza de alguns abrasivos comuns [10].

A tenacidade é a capacidade que os grãos abrasivos apresentam para suportar tensões provocadas por impacto, ou seja é a quantidade de trabalho necessário para fracturar um grão abrasivo sob determinada condição/ força aplicada. O conceito oposto à tenacidade é o de friabilidade, que corresponde à capacidade que os grãos abrasivos apresentam para se fracturarem durante a operação expondo novas arestas de corte [1].

A forma do grão é importante porque um grão angular desempenha melhor a sua função do que um grão arredondado. A dimensão do grão controla a profundidade do corte efectuado pelo grão [11]. Grão equidimensionais e maciços são muito resistentes, sendo menos friáveis que os grãos escamosos ou lascáveis. Os primeiros são seleccionados nas aplicações que envolvem muito calor e pressão, enquanto que os segundos são usados para polimento de precisão e quando se pretende obter uma superfície com um bom acabamento [11].

2.2.2. Materiais abrasivos sintéticos

Os abrasivos naturais têm progressivamente dado lugar a abrasivos sintéticos, em especial em aplicações de alta tecnologia.

Para o fabrico das mós abrasivas são usados materiais abrasivos sintéticos (cristalinos). Os mais utilizados são a alumina e o carboneto de silício (figura I.4). A escolha dos materiais abrasivos depende da aplicação final [8].

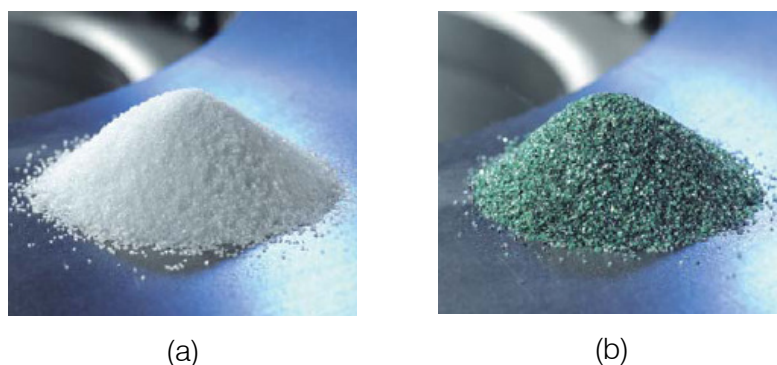


Figura I.4. (a) Fotografia de partícula de alumina; (b) Fotografia de partículas de carboneto de silício.

No presente trabalho utilizou-se a alumina como partícula (na indústria geralmente designada por grão) abrasiva. A alumina normal (95 – 96 % Al_2O_3) é fundida a partir da bauxite calcinada, sendo esta fundida num forno de fusão a arco. O bloco resultante é britado e moído e novamente calcinado. A alumina especial (99,5 – 99,8% Al_2O_3) é obtida através do processo Bayer, que consiste em atacar a bauxite com uma solução de soda cáustica a 10%, obtendo-se numa primeira fase uma solução saturada de aluminato de sódio. Numa segunda fase, o aluminato é hidrolisado, e o hidróxido de alumínio é calcinado ($950^\circ - 1000^\circ\text{C}$) obtendo-se uma alumina com poucas impurezas [15].

Os grãos de alumina são duros e tenazes e a sua forma de cunha permite uma penetração rápida sem se desgastar ou fracturar. É utilizado para maquinar materiais de alta resistência à tracção [7], de um modo geral são utilizados na maioria dos aços.

Os grãos abrasivos quando incorporados à matriz ligante dão origem às ferramentas abrasivas (mós). A fracção (ponderal) típica dos grãos abrasivos é de 85 a 90 % e a da matriz ligante é de 10 a 15 %.

2.3. Estrutura/ Porosidade

A estrutura de uma mó está relacionada com a distância dos grãos abrasivos entre si. Quanto maior a percentagem de grãos abrasivos, menor a distância entre os grãos e maior a densidade da mó. Através da percentagem dos grãos e da matriz ligante, é determinado o volume dos poros [1]. A estrutura do abrasivo poderá ser afinada para a aplicação correspondente, através da adição de formadores de porosidade. Existem vários materiais que podem actuar como formadores de porosidade, de que são exemplo [10]:

- Casca de noz moída;
- Esferas ocas de vidro;
- Esferas ocas ou esferas de material plástico ou compostos orgânicos (naftalina);
- Partículas de espuma de vidro;
- Bolas de mulite e/ ou alumina (espuma);
- Grafite.

2.4. Dureza

A dureza das mós abrasivas é a propriedade mais importante deste produto e caracteriza a resistência com que o grão abrasivo é retido pela ligação no corpo abrasivo. A porosidade, o volume de abrasivo, o tamanho de grão, a quantidade de matriz ligante e suas características específicas actuam numa complexa interdependência, fazendo com que a mó apresente uma maior ou menor dureza. Em geral uma mó com uma elevada percentagem de matriz ligante e estrutura fechada apresenta uma dureza elevada [8, 9, 16].

O sistema de medição Grindo-Sonic é o método mais utilizado para avaliar, de um modo não destrutivo e indirecto, a dureza das mós. Através da vibração da mó determina-se a sua frequência natural (depende das propriedades físicas e da dimensão da mó). Esta é convertida em módulo de Young (E), existindo uma relação entre este módulo e a dureza da mó [8, 9, 16, 17]. O valor de E é determinado matematicamente a partir de equações bem estabelecidas (ver Capítulo II).

3. Processo de fabricação das mós abrasivas vitrificadas

O processo de fabricação de mós vitrificadas engloba: preparação da mistura, conformação (prensagem), ciclo de cozedura, controle da qualidade e acabamento.

Apresenta-se de seguida o respectivo diagrama [8].

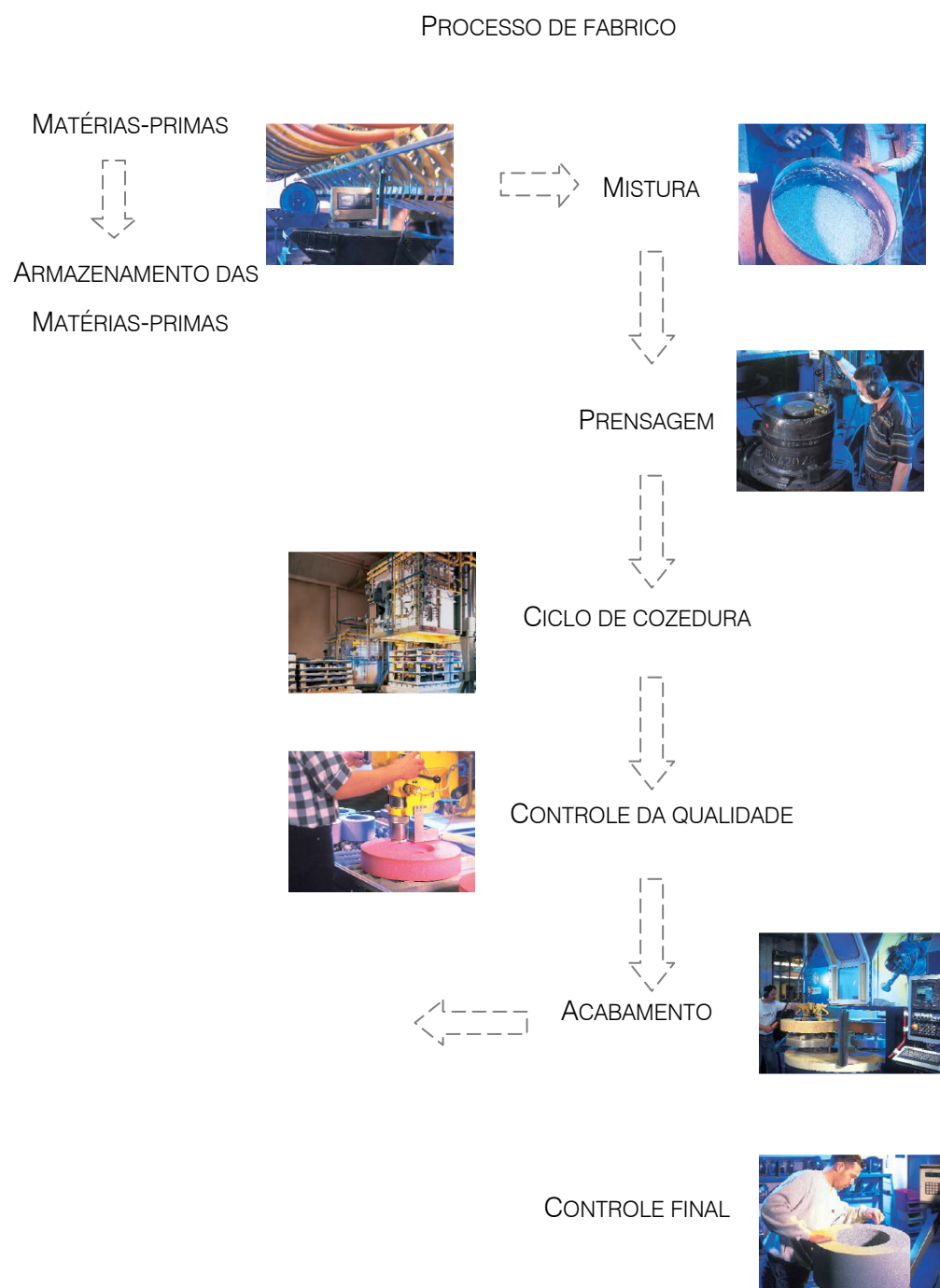


Figura I.5. Diagrama do processo de fabrico de mós vitrificadas.

3.1. Armazenamento das matérias-primas/ mistura

Na secção de armazenamento encontram-se os silos onde os grãos abrasivos são armazenados e uma secção de britagem e moagem das matérias-primas: argila, quartzo, feldspato, etc. Antes da moagem, estes materiais precisam de estar completamente secos. De seguida, são pesadas as quantidades necessárias de cada um dos materiais, sendo estes misturados e homogeneizados em misturadores, deixando a liga pronta para ser descarregada no silo correspondente. Na base e bocas de descarga dos silos, encontram-se balanças que servem para pesar as quantidades precisas de abrasivo e matriz ligante. Após a pesagem, o material é depositado no misturador. Para obter uma mistura correcta, deve-se considerar os seguintes parâmetros: quantidade de mistura, velocidade e tempo. Por último, a mistura é depositada em peneiros adequados ao tamanho do grão, ficando preparada para ser distribuída pelos respectivos moldes.

3.2. Prensagem/ secagem

A mistura preparada é pesada na quantidade adequada ao volume da mó pretendida. De seguida, é conformada numa prensa hidráulica. As pressões específicas de trabalho rondam os 20 kg/ cm² para este tipo de mós vitrificadas.

Após prensagem, as mós são secas em câmaras de secagem para eliminar a água da mistura, que durante a cozedura poderia provocar fissuras na peça. Esta água é evaporada através dos poros da peça.

3.3. Ciclo de cozedura

A operação de cozedura é a mais complexa e longa dentro da fabricação das mós vitrificadas. É necessário ter presente uma série de variáveis:

- 1) Temperatura;
- 2) Atmosfera da câmara;
- 3) Condições da chaminé;
- 4) Duração das fases do ciclo de cozedura;

- 5) Distribuição da carga;
- 6) Características das matrizes ligantes;
- 7) Tipo de combustível.

Os abrasivos vitrificados são submetidos a temperaturas da ordem dos 1200°C – 1300°C, num processo de sinterização reactiva, resultando uma matriz vítrea parcialmente porosa e maioritariamente amorfa (figura I.6). A sinterização é feita incorporando as partículas abrasivas e a matriz vítrea [4, 9]. A temperatura de sinterização é determinada pela matriz ligante.

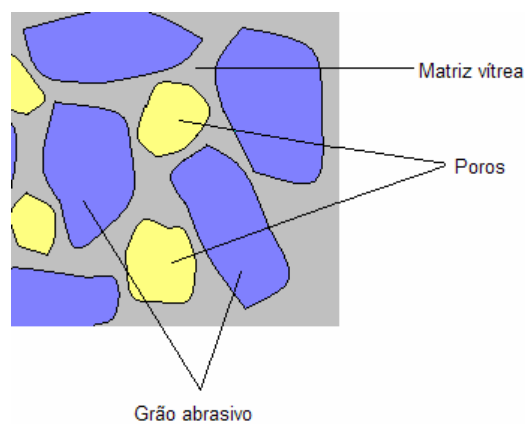
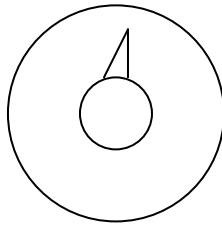


Figura I.6. Microestrutura representativa de uma mó abrasiva de matriz vítrea.

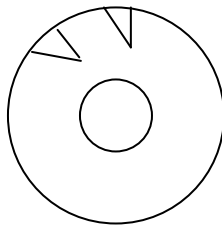
A acção do calor sobre a matriz ligante pode ser resumida da seguinte forma [16]:

- até aos 200°C: libertação de água de formulação;
- 200 – 400 °C: eliminação de matéria orgânica e saída da água de combinação dos hidratos;
- 400 – 800°C: saída de água de combinação das argilas e caulinos; e libertação de CO₂ (caso existam carbonatos);
- 800 – 1200 °C: decomposição dos sulfatos;
- 1200 – aproximadamente 1300°C: acção dos fundentes.

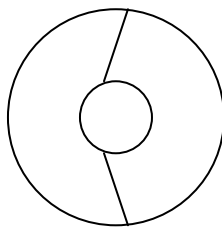
Na figura I.7 apresentam-se alguns dos defeitos típicos que podem ocorrer nas mós após o ciclo de cozedura (dependentes desta fase de produção) [16].



Defeito: Fenda radial; centro – periferia
Causa provável: arrefecimento rápido



Defeito: Fendas radiais; periferia – centro
Causa provável: aquecimento rápido



Defeito: Fenda transversal
Causa provável: manuseamento errado

Figura I.7. Defeitos típicos que podem ocorrer nas mós após o ciclo de cozedura [16].

3.4. Acabamento/ controle final

As peças, após cozidas, têm de ser acabadas nas medidas exigidas pelo utilizador. As operações de acabamento envolvem as seguintes operações: aplainar, posicionar e perfilar.

No final, são realizados às mós os seguintes ensaios:

- Avaliação qualitativa da dureza da mó – método Grindo – Sonic;
- Velocidade de ruptura;
- Análise dimensional.

4. Aplicações

As ferramentas abrasivas trabalham com velocidades periféricas relativamente elevadas. Uma mó abrasiva vitrificada pode atingir velocidades periféricas de 60 – 80 m/s. Com estas velocidades as temperaturas atingem, no ponto de contacto mó/ peça, valores elevadíssimos. O calor produzido é dissipado pela peça, pela mó, pelo ar e pelo fluido refrigerante, podendo provocar reacções químicas, sendo este facto muito importante para definir os parâmetros de uma determinada operação (tipo de abrasivo, fluido refrigerante, velocidade de trabalho) [18].

As mós abrasivas vitrificadas apresentam um enorme campo de aplicação, desde operações de acabamento até operações de precisão, são resistentes a quase todos os tipos de ácidos e podem ser conservadas durante anos sem perder nenhuma das suas propriedades, não são afectadas pelas mudanças de temperatura e humidade, nem pelos óleos ou fluidos refrigerantes [18].

Existem vários tipos e formas de mó, adequados ao trabalho de rectificação que se deseja fazer e, principalmente, à natureza do material a ser rectificado [7].

Os factores essenciais que condicionam a escolha de uma mó abrasiva são:

- Tipo de material a maquinar;
- Tipo de operação;
- Área de contacto;
- Acabamento.

Conhecidos estes factores determina-se o material abrasivo e respectiva granulometria, a dureza, a estrutura e a matriz ligante da mó [17].

As mós abrasivas vitrificadas podem ser aplicadas em diferentes tipos de rectificação, de que são exemplo a rectificação plana, a rectificação cilíndrica, a rectificação sem centros, a rectificação interna [7, 8, 18].

A rectificação plana é altamente produtiva, permitindo rectificar grandes superfícies em tempos reduzidos. A rectificação cilíndrica é aplicada na rectificação de eixos, semieixos, pinos, cambotas e cilindros hidráulicos. Na rectificação sem centros a peça a rectificar não necessita de fixação, esta é centrada pela mó de controle e pela mesa de trabalho. Na rectificação interna são utilizadas estruturas relativamente abertas, devido ao contacto superficial entre a peça e a mó [7, 8, 18].

A utilização de ferramentas de rectificação eficientes é, actualmente, um factor importante para o funcionamento e a rentabilidade de produtos em quase todos os

sectores industriais. Os progressos no desenvolvimento de ferramentas são acompanhados de uma optimização contínua das propriedades dos produtos abrasivos.

Capítulo II. Metodologia Experimental

No presente capítulo apresentam-se os abrasivos vitrificados seleccionados e procede-se à descrição das técnicas de caracterização utilizadas na caracterização das matérias-primas, matrizes vítreas e abrasivos vitrificados.

1. Abrasivos vitrificados seleccionados

Numa primeira etapa da abordagem ao problema fez-se a selecção dos abrasivos vitrificados. Estes foram seleccionados de acordo com as necessidades do fabricante, ou seja, seleccionaram-se os abrasivos vitrificados mais representativas a nível comercial:

- Abrasivo vitrificado AA: grão abrasivo A (alumina); matriz vítrea A;
- Abrasivo vitrificado AB: grão abrasivo A (alumina); matriz vítrea B;
- Abrasivo vitrificado AC: grão abrasivo A (alumina); matriz vítrea C.

A diferença entre estes abrasivos vitrificados reside na matriz vítrea. As matrizes – A, B e C – são obtidas a partir de materiais naturais – argila, caulino e feldspato – e uma frita comercial. Por razões de confidencialidade não é possível apresentar as respectivas percentagens das matérias-primas para cada matriz. Qualitativamente distinguem-se por:

- Matriz A: mais de 50 % de feldspato e o restante é maioritariamente frita;
- Matriz B: mais de 50 % de feldspato e o restante é maioritariamente argila;
- Matriz C: mais de 50 % de argila e o restante é maioritariamente feldspato.

Os abrasivos vitrificados seleccionados para posterior caracterização microestrutural e mecânica, foram sujeitos às mesmas etapas sucessivas de fabrico, usadas para este tipo de mós vitrificadas. De uma forma sucinta descrevem-se as diferentes etapas: as matérias-primas foram misturadas dando origem às misturas que compõem a matrizes ligantes; de seguida, estas foram adicionadas ao grão abrasivo (alumina, 270 μm) nas proporções referidas na tabela II.1; posteriormente, e após prensagem, realizaram-se as etapas de secagem e sinterização; as amostras foram submetidas durante 18 horas à temperatura de 1280 °C, num forno a gás. Este procedimento foi realizado na fábrica. O ciclo térmico utilizado encontra-se representado na figura II.1.

Tabela II.1 Quantidade de matriz ligante adicionada ao grão abrasivo (% peso).

<i>Matriz ligante</i>	<i>% Peso</i>
A	10,5
B	10,5
C	9,0

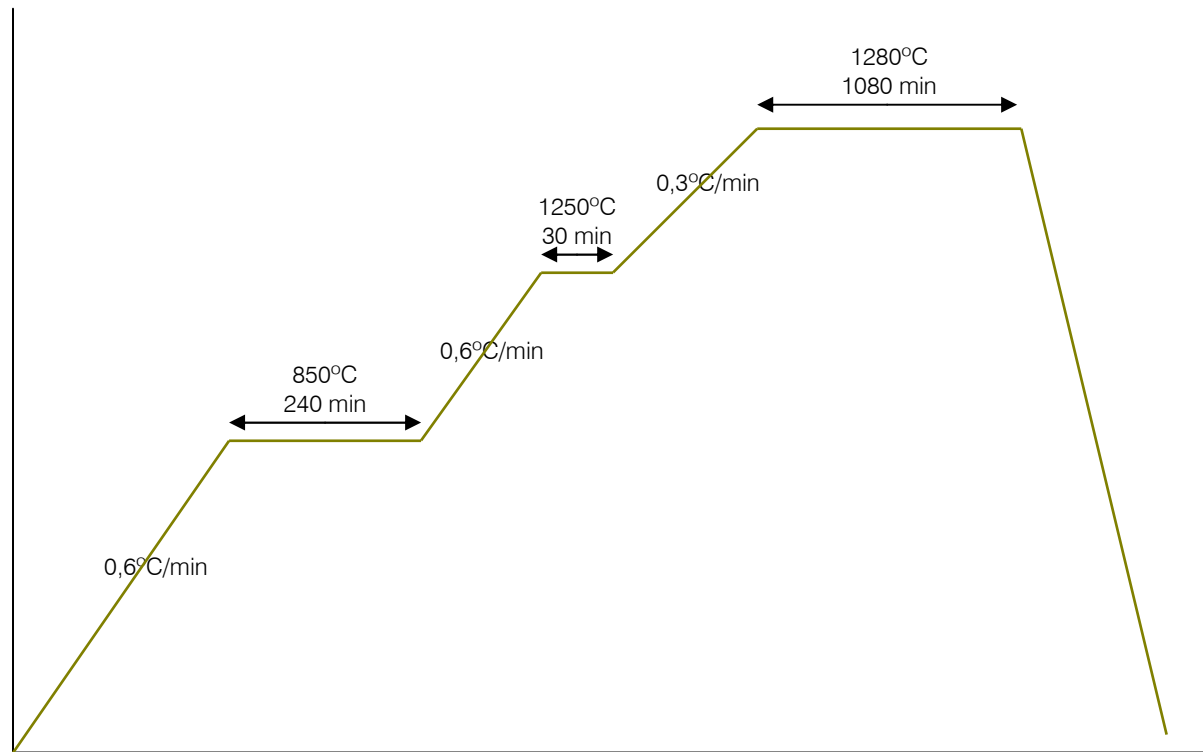


Figura II.1. Ciclo térmico utilizado neste tipo de mós vitrificadas.

2. Técnicas de caracterização

Após a selecção dos abrasivos vitrificados procedeu-se à caracterização química, mineralógica e granulométrica das matérias-primas que compõem as matrizes A, B e C. Seguidamente, procedeu-se à caracterização mineralógica e térmica das matrizes vítreas e por último fez-se a caracterização térmica, microestrutural e mecânica dos abrasivos vitrificados.

As técnicas de caracterização utilizadas – DRX, ATD, ATG, SEM, análise granulométrica, análise dilatométrica, resistência à compressão, resistência à flexão, choque térmico, módulo de Young – foram realizadas na Universidade de Aveiro, no Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro; à excepção das análises por FRX que foram realizadas no Departamento de Geociências (Universidade de Aveiro) e dos ensaios de velocidade de ruptura que foram realizados na fábrica.

As técnicas anteriormente descritas forneceram informações que se complementaram e que foram importantes para o conhecimento dos abrasivos vitrificados.

2.1. Matérias-primas

2.1.1 Espectrometria de fluorescência de raios – x (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios – X permite a obtenção de informação sobre a composição química qualitativa e quantitativa dos materiais. As matérias-primas foram analisadas num espectrómetro de raios – X, modelo Axios. Utilizou-se uma ampola de ródio.

2.1.2. Difracção de raios – x (DRX)

A estrutura cristalográfica das matérias-primas foi determinada por meio de um difratómetro de RX, modelo *Rigaku Radiation Shield Bruker*. Utilizou-se uma ampola de cobre, cuja radiação é igual a $K\alpha_1 = 1,54056 \text{ \AA}$.

2.1.3. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi efectuada nas matérias-primas e na mistura destas que compõem as matrizes. Esta análise foi realizada no aparelho *Coulter – LS230*.

2.2. Matrizes vítreas

2.2.1. Difraccção de raios – X (DRX)

Para a realização destes ensaios prepararam-se amostras das respectivas misturas que compõem as matrizes. As amostras foram preparadas no laboratório e sinterizadas à temperatura de 1280°C, por 18 horas, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Após este procedimento a estrutura cristalográfica das matrizes vítreas foi determinada por meio de um difratómetro de RX, modelo *Rigaku Radiation Shield Bruker*. Utilizou-se uma ampola de cobre, cuja radiação é igual a $K\alpha_1 = 1,54056 \text{ \AA}$.

2.2.2. Análise dilatométrica

O processo de obtenção das amostras, para análise dilatométrica, foi em tudo semelhante ao anteriormente descrito no ponto 2.2.1. Esta análise foi realizada às matrizes vítreas utilizando um dilatómetro, modelo *Bahr – DIL 801L*, nas seguintes condições de operação: taxa de aquecimento de 10°C/min e intervalo de temperatura variando desde a temperatura ambiente até 800°C.

2.3. Abrasivos vitrificados

2.3.1. Densidade/absorção de água/porosidade

Para a realização destes ensaios foram preparadas cinco amostras de cada composição (abrasivos vitrificados).

A determinação da densidade em verde foi calculada a partir do peso da amostra e do volume geométrico.

Para a determinação da densidade, absorção de água e porosidade, após sinterização das amostras, utilizou-se a *Norma ASTM C20-00* baseada no princípio de Arquimedes [19]

Procedeu-se à pesagem das amostras após sinterização (m_s); seguidamente foram colocadas num recipiente com água a ferver (100°C) durante 2 horas; ao fim deste tempo, o aquecimento foi interrompido e as amostras permaneceram dentro de água durante 24 horas; posteriormente, as amostras foram retiradas da água procedendo-se à pesagem da massa imersa de cada uma (m_i); por último, secou-se a superfície e pesou-se a massa das amostras húmidas (m_h).

Esta *Norma* apresenta as seguintes fórmulas:

$$\rho_a = m_s / (m_h - m_i) * \rho_{\text{água}}$$

$$A_a = ((m_h - m_s) / m_s) * 100$$

$$P_a = (m_h - m_s) / (m_h - m_i) * 100$$

onde,

ρ_a – massa específica aparente (g/cm³);

A_a – absorção de água (%);

P_a – porosidade aparente (%);

m_s – massa seca da amostra (g);

m_i – massa da amostra imersa em água, depois de 2 horas em ebulição e 24 horas de repouso (g);

m_h – massa da amostra húmida medida após a massa imersa, secando a superfície para retirar a água em excesso (g).

$$\rho_{\text{água}} = 1 \text{ g/cm}^3$$

2.3.2. Retracção linear

Para a determinação da retracção linear foram preparadas 5 amostras de cada composição (abrasivos vitrificados), aproximadamente com 20 mm de diâmetro, 8 mm de espessura e 5 g de massa. Após a preparação das amostras, estas foram submetidas a diferentes patamares de sinterização num forno eléctrico. No final, para cada amostra foi calculada a percentagem de retracção linear sofrida.

2.3.3. Microscopia electrónica de varrimento (SEM)

As amostras preparadas para análise microestrutural foram cortadas da zona de fractura dos provetes (figura II.2), que foram sujeitos aos ensaios de flexão. Após a deposição de carbono, as amostras foram observadas no microscópio, modelo *Hitachi S-4100 Scannig Electron Microscope*.



Figura II.2. Fotografia representativa da zona de corte para análise microestrutural.

2.3.4. Características mecânicas

Com o intuito de avaliar os abrasivos vitrificados sob o ponto de vista do comportamento mecânico, foram realizados ensaios de velocidade de ruptura, ensaios de flexão, ensaios de compressão, ensaios de choque térmico e determinação do módulo de Young. O estudo destas propriedades mecânicas a partir da sua correlação com a composição da matriz e microestrutura constituiu um ponto importante na discussão dos resultados.

a) Velocidade de ruptura

Os ensaios de velocidade de ruptura foram realizados na fábrica, utilizando-se mós vitrificadas representativas de cada lote.

Durante a operação de rectificação a força centrífuga é a mais importante, sendo esta a que definirá a tensão máxima de trabalho permitida para as diferentes mós [16]:

$$F_c = (P/g) * (V^2/R)$$

sendo: P/g – massa

V – velocidade periférica

R – raio médio

F_c – força centrífuga

Como a força centrífuga é proporcional ao quadrado da velocidade periférica, pode-se definir o factor de segurança de uma mó através da seguinte equação [16]:

$$F_s = (V_r/V_t)^2$$

sendo: V_r – velocidade de ruptura

V_t – velocidade de trabalho

F_s – factor de segurança

Os ensaios de velocidade são importantes para garantir a resistência da mó às tensões originadas pela força centrífuga, durante a operação de rectificação.

b) Resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão foram preparados vários lotes com 5 amostras cilíndricas (50 Ø x 50 mm) de cada composição. Estas foram sujeitas ao mesmo ciclo térmico, na fábrica, mas, em fornadas diferentes (avaliação da reprodutibilidade do processo fabril). Após esta preparação as amostras foram ensaiadas numa máquina de ensaios mecânicos, universal, modelo *Shimadzu AG-25TA Autograph* (célula de 200 kN).

c) Resistência à flexão

Os ensaios de flexão realizados de acordo com a *Norma C1161-02C* [20], sendo aplicada uma força distribuída em quatro pontos.

O processo de obtenção das amostras foi em tudo semelhante ao anteriormente descrito, excepto na forma das amostras que, neste caso, eram provetes paralelepípedicos com aproximadamente 15 mm de espessura, 30 mm de largura e 130 mm de comprimento. Estes foram ensaiados numa máquina de ensaios mecânicos, universal, modelo *Zwick/Roell Z020* (célula de 20 kN).

Para além destes ensaios de resistência à flexão, foram realizados outros ensaios de resistência à flexão a alta temperatura (400 °C). Para estes foram preparadas amostras com as seguintes dimensões: 6,8 mm de espessura, 7,7 mm de largura e 30,5 mm de comprimento. Utilizou-se a mesma máquina de ensaios mecânicos universal (célula de 2,5 kN), com um forno acoplado. As amostras foram aquecidas a 10°C/min, até 400°C, mantidas 20 minutos a esta temperatura. Após este tempo, deu-se início ao ensaio de flexão.

d) Resistência ao choque térmico

O processo de obtenção dos provetes foi igual ao anteriormente descrito. Para a realização destes ensaios as amostras foram submetidas à temperatura de 600 °C. Uma vez atingida esta temperatura, as amostras permaneceram por mais 30 minutos dentro do forno e, de seguida, foram retiradas e mergulhadas num recipiente com água à temperatura ambiente. Posteriormente, as amostras foram colocadas na estufa por um período de 24 horas, à temperatura de 90°C, realizando-se os ensaios de flexão à temperatura ambiente. O cálculo da % de resistência à flexão foi determinado através da relação entre a resistência à flexão (após choque térmico) e a resistência à flexão original.

e) Módulo de Young

Para a determinação do módulo de Young utilizaram-se mós com as seguintes dimensões: 59,5 mm de diâmetro interno, 30 mm de espessura e 250 mm de diâmetro externo. Os ensaios foram realizados num equipamento, modelo *Grindo-Sonic MK5*.

Os módulos de elasticidade de uma mó podem ser facilmente medidos através do Grindo-Sonic. O procedimento consiste em excitar a mó através de um ligeiro impulso mecânico externo. Através da vibração da mó determina-se a sua frequência natural (esta depende das propriedades físicas e da dimensão da mó); os valores são de seguida convertidos em módulo de Young: [17, 21, 22].

Decneut propôs a seguinte equação para a determinação do módulo de Young de mós [23]:

$$E = (\rho \cdot P \cdot D^2) / R^2 \quad \text{kN/mm}^2$$

sendo: E – módulo de elasticidade ($\text{kN/mm}^2 = 10^3 \text{ N/mm}^2 \sim 100 \text{ kg/mm}^2$)

ρ – densidade (kg/mm^3)

P – constante de Poisson's

D – diâmetro externo do disco (mm)

R – leitura no Grindo-Sonic; (micro - segundos)

$$R = 2 \times 10^6 / F$$

sendo: F – frequência (Hz ou kHz)

Snoeys et al determinaram a “dureza” de mós vitrificadas usando o método Grindo-Sonic e concluíram que o módulo de elasticidade é uma boa medida para avaliar a dureza das mós vitrificadas [17].

A natureza não destrutiva dos testes, juntamente com a rapidez e facilidade do processo permite a realização de numerosas medidas.

Capítulo III. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios mencionados no Capítulo II. Procurou-se correlacionar os vários resultados obtidos, desde a composição das matérias-primas até às propriedades mecânicas dos abrasivos vitrificados.

1. Matérias-primas

As matérias-primas foram submetidas a estudos laboratoriais que permitiram proporcionar informações quanto à respectiva composição química, composição mineral e diâmetro das partículas.

1.1. Composição química

A tabela III.1 apresenta a composição em óxidos do caulino e feldspato, de acordo com dados de fornecedores; e a composição da argila e da frita, que foram analisadas por espectrometria de fluorescência de raios X, no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Tabela III.1. Composição em óxidos (% peso) das matérias-primas (caulino, feldspato e argila) e da frita.

% Peso	Feldspato	Caulino	Argila	Frita
SiO_2	71,80	46,13	63,19	60,30
Al_2O_3	17,00	37,71	27,42	9,19
Na_2O	5,30	0,21	0,27	0,27
K_2O	3,20	0,33	3,98	4,01
Fe_2O_3	0,18	0,79	2,86	0,15
MgO	0,04	0,10	0,41	0,81
CaO	0,75	0,18	0,11	12,28
TiO_2	0,01	0,37	1,72	0,06
P_2O_5	0,80	0,24	0,04	0,07
ZnO		-	-	12,86
PR	1,02	13,91	-	-
<i>Total</i>	100	100	100	100

Estes resultados proporcionaram informações importantes para a caracterização, previsão e entendimento das matrizes vítreas, contudo, estes dados devem ser analisados em paralelo com resultados provenientes da aplicação de outras técnicas.

1.2. Composição cristalográfica

As figuras seguintes apresentam os difractogramas de raios-X das matérias-primas, identificando as fases cristalinas presentes.

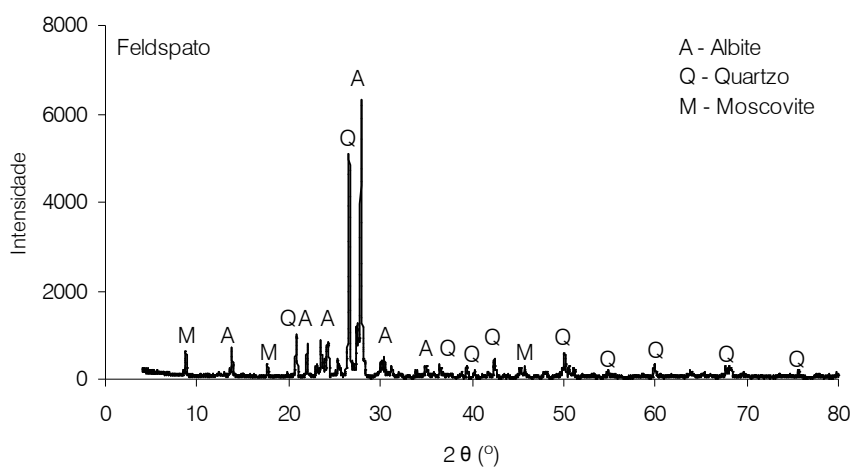


Figura III.1. Difractograma de raios – X do feldspato.

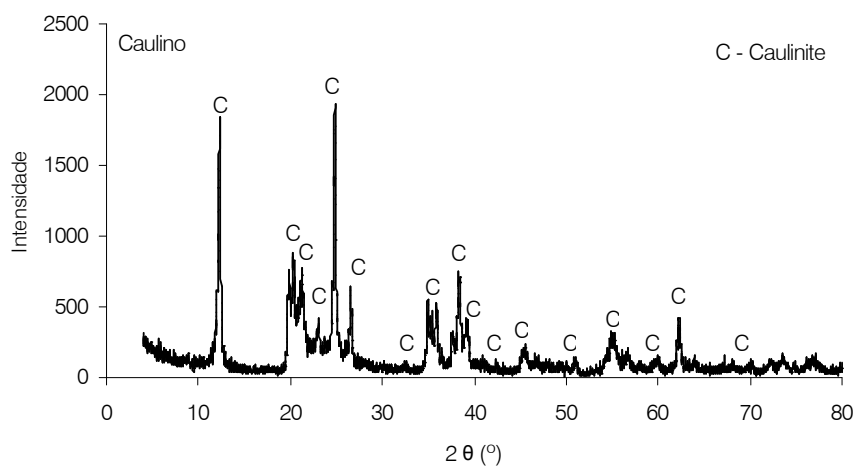


Figura III.2. Difractograma de raios – X do caulino.

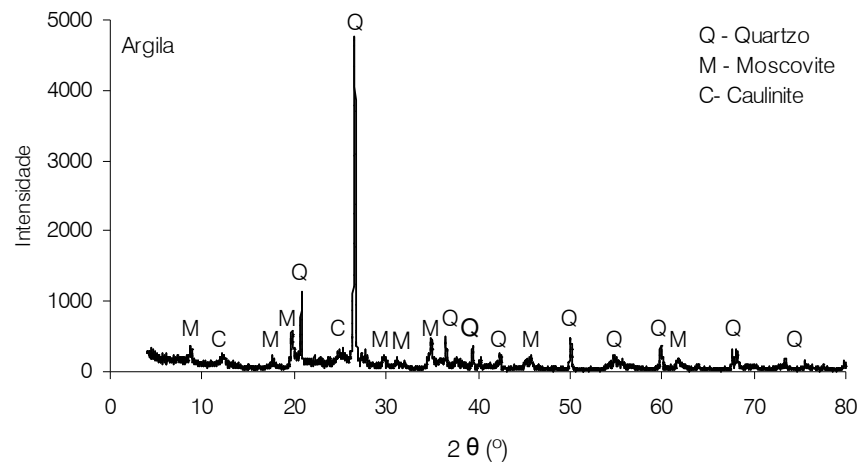


Figura III.3. Difractograma de raios – X da argila.

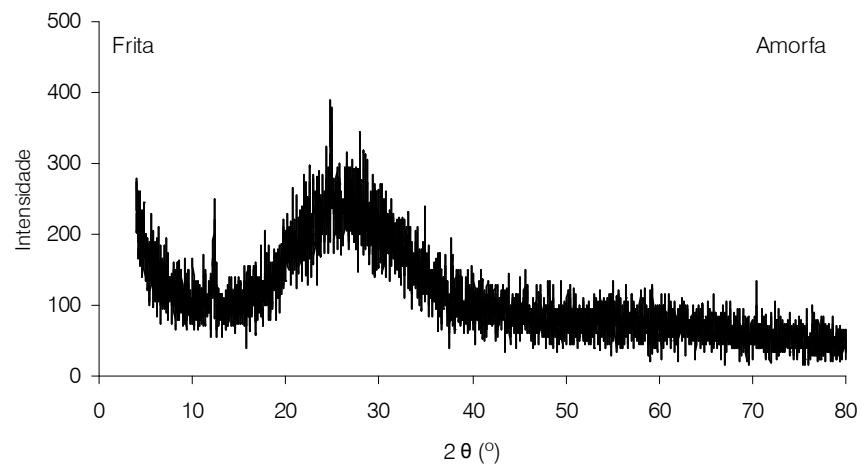


Figura III.4. Difractograma de raios – X da frita.

1.3. Análise granulométrica

Nos gráficos seguintes são apresentados os resultados das análises granulométricas realizadas às matérias-primas e misturas das matrizes.

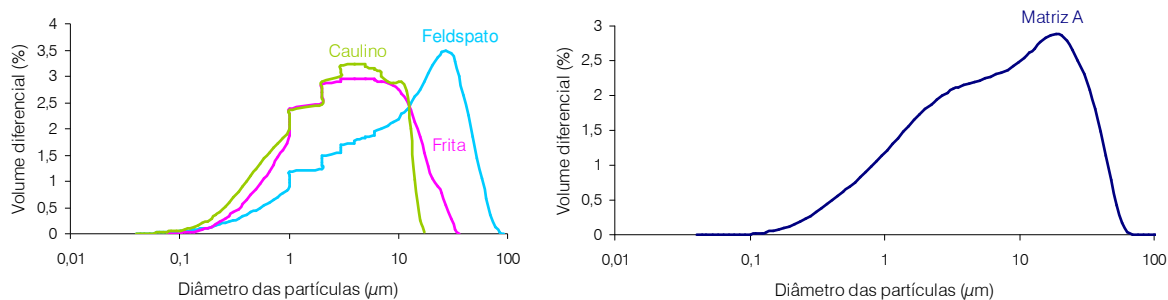


Figura III.5. Distribuição granulométrica da matriz A e respectivas matérias-primas.

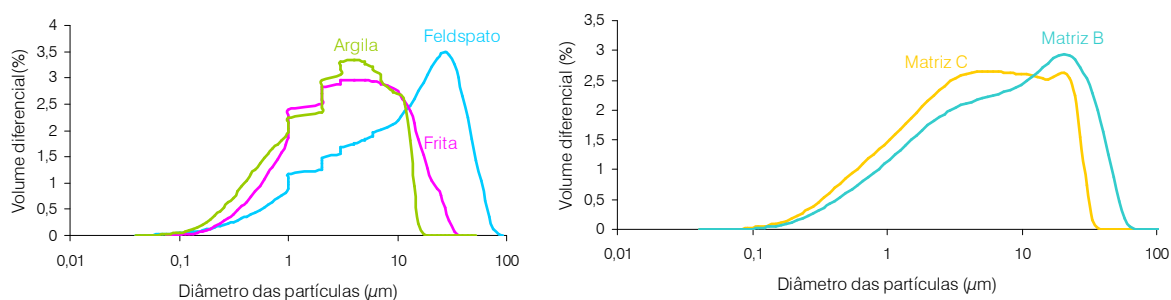


Figura III.6. Distribuição granulométrica da matriz B e C e respectivas matérias-primas.

Pela análise dos gráficos III.5 e III.6 depreende-se que a matriz A e a matriz B apresentam fortes semelhanças no que diz respeito à distribuição granulométrica. A matriz A apresenta uma média de tamanho de partículas de 12,0 μm e a matriz B de 12,5 μm . A matriz C apresenta uma distribuição granulométrica diferente, apresentando uma média de tamanho de partícula de 7,9 μm . Esta diferença reside nas percentagens em peso das matérias-primas, ou seja, a composição da matriz C é composta por uma maior percentagem de argila, com distribuição granulométrica mais fina, enquanto que as matrizes A e B são compostas por uma maior percentagem de feldspato, com distribuição granulométrica mais grossa, este deveria ser mais fino para tornar o sistema menos refractário.

2. Matriz vítrea

Após a mistura das matérias-primas para formação das matrizes A, B e C, estas foram submetidas a um processo de sinterização, à temperatura de 1280°C, dando origem às matrizes vítreas.

2.1. Composição cristalográfica

As figuras seguintes apresentam os difractogramas de raios-X das matrizes vítreas (após sinterização a 1280 °C, com um patamar de 18 horas), identificando as fases cristalinas presentes.

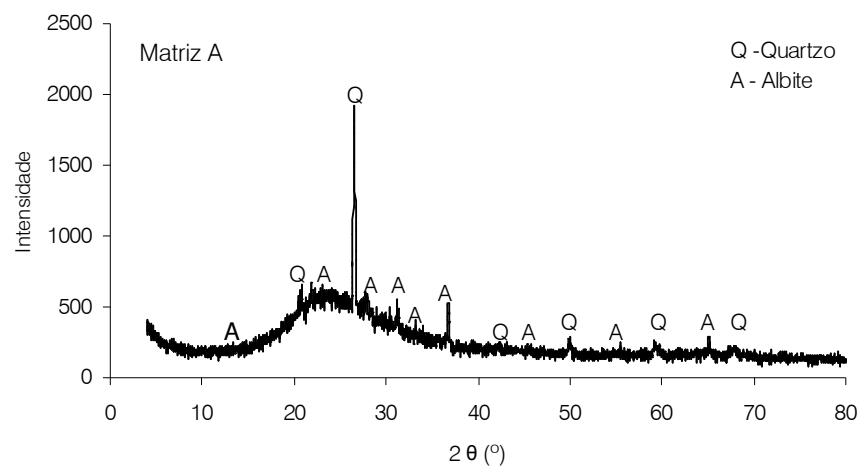


Figura III.7. Difractograma de raios – X da matriz A.

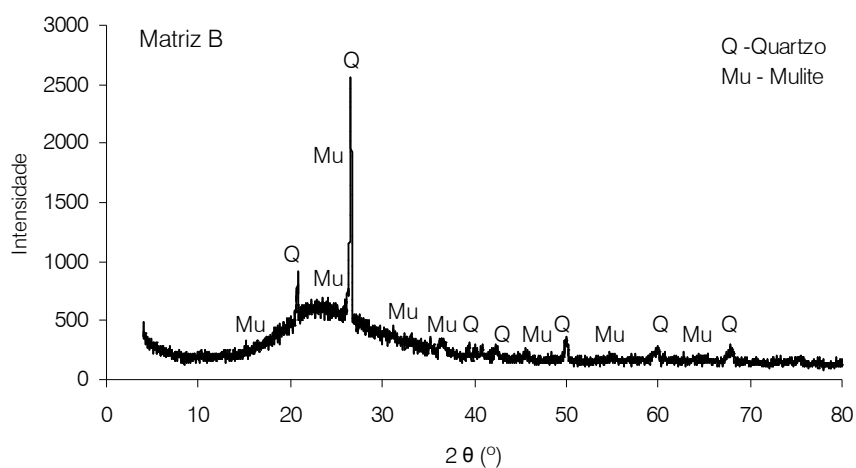


Figura III.8. Difratograma de raios – X da matriz B.

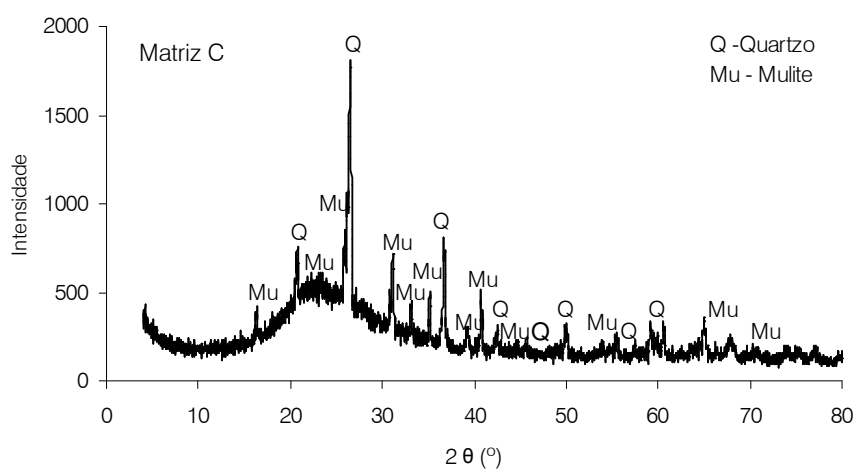


Figura III.9. Difratograma de raios – X da matriz C.

As proporções destas fases dependem da composição em óxidos da matéria-prima (Al_2O_3 , SiO_2 e fundentes).

2.2. Composição química

Através da percentagem das matérias-primas (composição das matrizes) e da respectiva composição em óxidos (tabela III.1), calcularam-se as percentagens em óxidos das diferentes matrizes (tabela III.2).

Tabela III.2. Composição em óxidos (% peso) das matrizes.

% Peso	Matriz A	Matriz B	Matriz C
SiO_2	67,64	69,28	65,35
Al_2O_3	17,27	18,59	22,01
Na_2O	3,87	3,89	1,51
K_2O	3,09	3,42	3,79
Fe_2O_3	0,23	0,74	1,76
MgO	0,19	0,17	0,26
CaO	2,62	1,32	1,88
TiO_2	0,05	0,37	1,03
P_2O_5	0,61	0,59	0,22
ZnO	2,44	0,90	1,93
PR	1,99	0,73	0,26
<i>Total</i>	100	100	100

Utilizou-se o diagrama de fases ternário $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$ para o estudo destas matrizes (publicado numa compilação de diagramas [24]). Neste sistema ternário, representado na figura III.10, foram marcados, num triângulo de Gibbs gerado numa folha de cálculo Excel, os pontos correspondentes às composições das matérias-primas (tabela III.1) e das matrizes (tabela III.2). Para esta representação, e para simplificação, considerou-se o somatório dos óxidos fundentes (Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , CaO , P_2O_5) como equivalente à composição Na_2O .

Na tabela III.3 são apresentados os valores normalizados, usados para marcar os pontos no diagrama de fases.

Tabela III.3. Composição em óxidos (% peso) das matrizes.

<i>% Peso</i>	<i>Matriz A</i>	<i>Matriz B</i>	<i>Matriz C</i>
<i>SiO₂</i>	70,67	70,72	67,40
<i>Al₂O₃</i>	18,29	19,07	23,00
<i>Óxidos fundentes</i>	11,04	10,22	9,60
<i>Total</i>	100	100	100

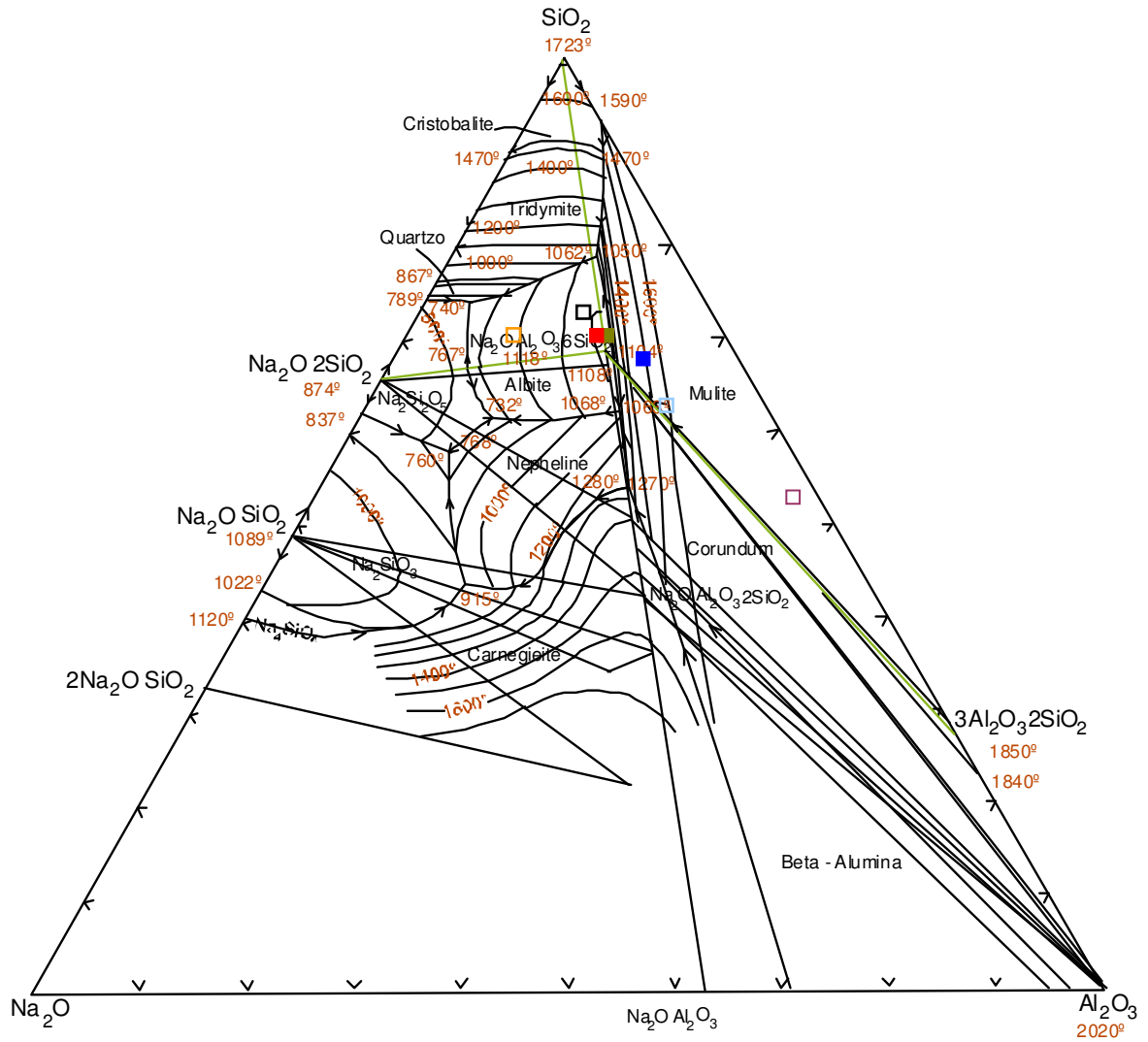


Figura III.10. Sistema ternário SiO₂ – Al₂O₃ – Na₂O [24].

Analisando o diagrama observa-se que a matriz A pertence ao triângulo de compatibilidade $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (albite). A temperatura de início de fusão é de aproximadamente 740°C e a temperatura final de 1100°C.

A matriz B e C pertencem ao triângulo de compatibilidade $\text{SiO}_2 - 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (mulite) – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (albite). Considera-se a matriz B neste triângulo, uma vez que na análise da DRX as fases cristalinas presentes são o quartzo e a mulite (figura III.8). Para estas matrizes a temperatura de início de fusão é de aproximadamente 1050°C e a temperatura final de 1150°C para a matriz B e de 1450°C para a matriz C.

Correlacionando estes resultados com as matérias-primas que compõem as matrizes, conclui-se que a matriz A apresenta um ponto de fusão mais baixo, uma vez que apresenta uma maior quantidade de frita, sendo esta bastante fusível reduzindo a temperatura do sistema. Por outro lado, a matriz C é a mais refractária, dado o elevado teor em argila.

2.3. Análise dilatométrica

Através da análise dilatométrica determinou-se o coeficiente de expansão térmica das matrizes vítreas. Estes apresentam valores próximos aos da literatura [3] (Capítulo I).

Tabela III.4. Valores de coeficiente de expansão térmica para as diferentes matrizes vítreas

<i>Matriz vítrea</i>	Coeficiente de expansão térmica (°C ⁻¹)
A	$6,33 \times 10^{-6}$
B	$6,21 \times 10^{-6}$
C	$4,49 \times 10^{-6}$

A matriz A e B apresentam um coeficiente de expansão térmica próximo da alumina ($8 - 9,5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$), obtendo-se assim uma melhor adesão. A compatibilidade térmica evita tensões interfaciais nas mós [3].

3. Abrasivos vitrificados

Após a análise das matérias-primas e das matrizes vítreas procedeu-se à caracterização dos abrasivos vitrificados (AA; AB; AC): densidades/ absorção de água/ porosidade, retracção linear, análise microestrutural e ensaios mecânicos. No final da caracterização procurou-se correlacionar os resultados das propriedades mecânicas com as microestruturas obtidas e com a composição das matrizes e respectivos pontos no diagrama de fases $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$.

3.1. Densidades/ absorção de água/ porosidade

Na tabela III.5 são apresentados os resultados da densidade, absorção de água e porosidade das diferentes composições seleccionadas.

Tabela III.5. Densidade dos abrasivos vitrificados em verde. Densidade, absorção de água e porosidade após sinterização (temperatura de 1280 °C; 18 horas de patamar).

<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>Densidade em verde (g/cm³)</i>	<i>Densidade após sinterização (g/cm³)</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Porosidade (%)</i>
AA	1,98	2,18	10,41	27,81
AB	2,00	2,19	14,00	33,94
AC	1,99	2,18	10,42	27,72

Observa-se pela análise da tabela que as amostras apresentam valores muito próximos de densidade, absorção de água e porosidade. Pode-se concluir que estes materiais não sofrem densificação completa, sendo desenhados para apresentarem uma percentagem de porosidade elevada.

3.2. Retraccção linear

Tabela III.6. Retraccção linear dos abrasivos vitrificados após sinterização (temperatura de 1280 °C; 18 horas de patamar).

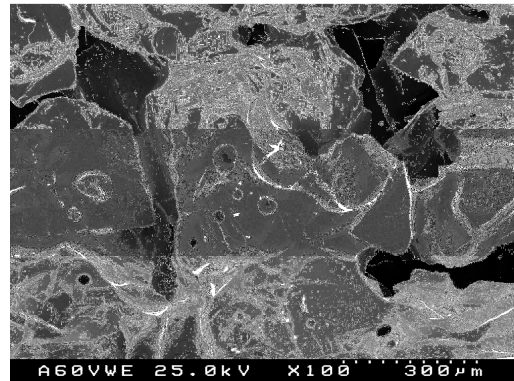
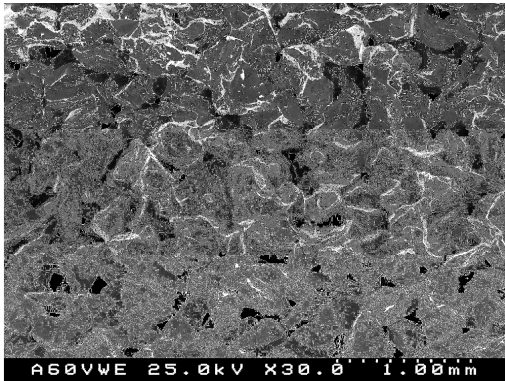
<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>Retracção linear após sinterização (%)</i>
AA	0,51
AB	1,02
AC	0,52

A análise dos resultados permite evidenciar que, após sinterização, a retraccção linear é quase nula para os três abrasivos vitrificados. Esta situação é explicada tendo em conta o que foi referido anteriormente (estes materiais não sofrem densificação completa e apresentam elevada porosidade).

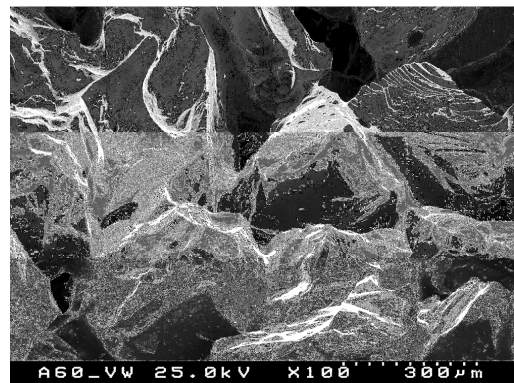
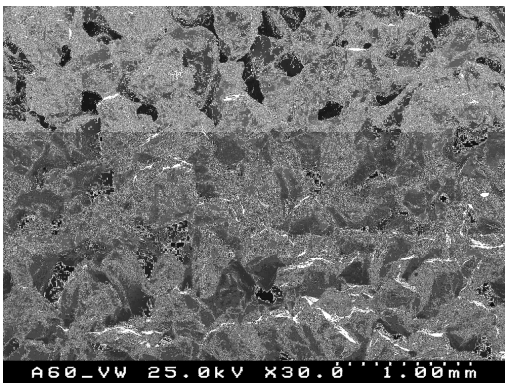
3.3. Microestrutura

As fotomicrografias observadas nas figuras seguintes dizem respeito à superfície de fractura dos diferentes abrasivos vitrificados.

Abrasivo vitrificado AA



Abrasivo vitrificado AB



Abrasivo vitrificado AC

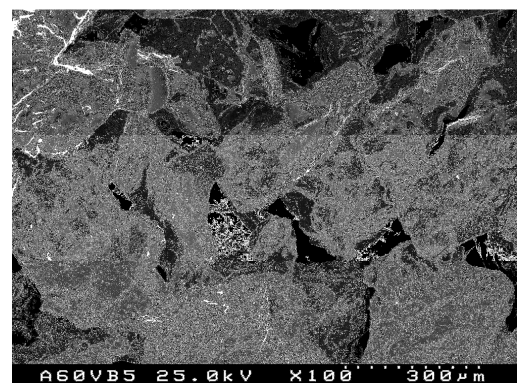
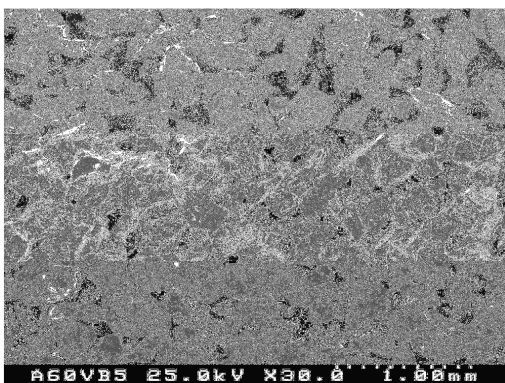


Figura III.11. Fotomicrografias SEM da superfície de fractura dos abrasivos vitrificados AA, AB e AC em ampliações distintas (a coluna da direita mostra as microestruturas em maior ampliação).

Observa-se pela análise das fotomicrografias que, após sinterização, obtém-se um produto parcialmente poroso e maioritariamente amorfo. Para além dos poros são identificados grãos abrasivos (alumina) e matriz vítrea, como se observa na figura III.12. Os grãos abrasivos apresentam o mesmo tamanho de grão nas diferentes microestruturas.

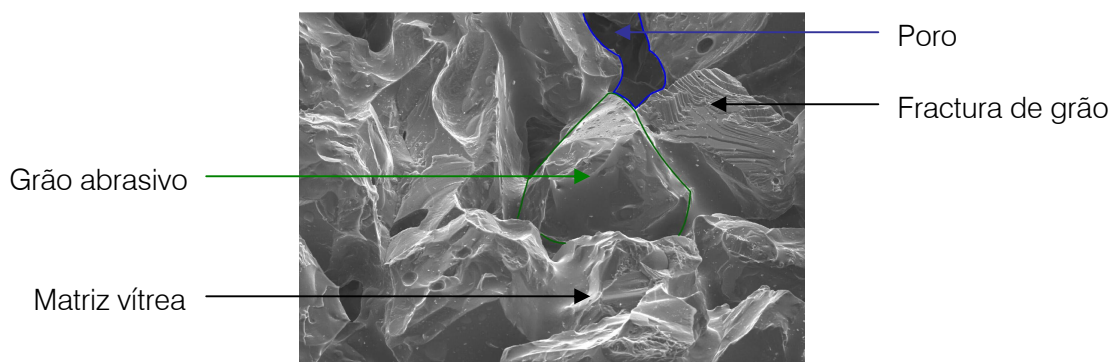


Figura III.12. Fotomicrografia SEM representativa dos abrasivos vitrificados.

Pela análise das fotomicrografias verifica-se que a matriz vítrea é insuficiente para preencher os poros, não havendo assim densificação completa. As diferenças entre os abrasivos AA, AB e AC devem-se essencialmente à composição da matriz vítrea. Observando a fotomicrografia do abrasivo vitrificado AC pode observar-se que não houve reacção completa de todos os constituintes, uma vez que a percentagem de matriz ligante adicionada ao grão abrasivo é pequena (9%) (tabela II.1). As microestruturas obtidas são função da composição da matriz e da quantidade de matriz ligante adicionada ao grão abrasivo.

3.4. Ensaios mecânicos

Através da realização dos ensaios mecânicos procedeu-se à comparação com os ensaios de caracterização utilizados na fábrica (velocidade de ruptura e o módulo de Young), de forma a avaliar a reprodutibilidade dos mesmos. No final deste ponto discutem-se globalmente os resultados.

a) Velocidade de ruptura

Na tabela III.7 são apresentados os valores da velocidade de ruptura para os diferentes abrasivos vitrificados.

Tabela III.7. Valores da velocidade de ruptura dos abrasivos vitrificados.

<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>Velocidade de ruptura (m/s)</i>
AA	108
AB	104
AC	93

b) Resistência à flexão

Com os provetes prismáticos de 15x30x130 mm³ foram realizados ensaios de flexão. Na figura III.13 apresenta-se a fotografia de um provete usado neste ensaio, antes e após ensaio de flexão.

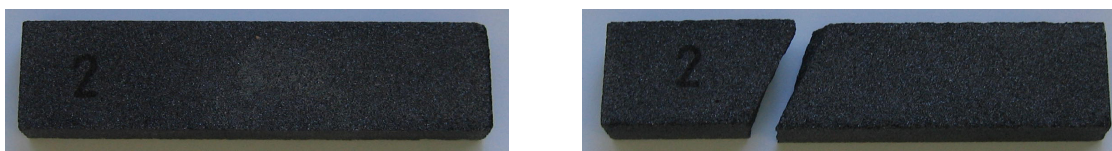


Figura III.13. Fotografia exemplificativa de um provete usado no ensaio de flexão.

A tabela III.8 apresenta os valores de resistência à flexão (R.F.) para os diferentes abrasivos vitrificados em diferentes lotes.

Tabela III.8. Valores de resistência à flexão dos abrasivos vitrificados (lotes diferentes).

Abrasivo vitrificado	1º Lote <i>R.F. (MPa)</i>	2º Lote <i>R.F. (MPa)</i>	3º Lote <i>R.F. (MPa)</i>	4º Lote <i>R.F. (MPa)</i>	Média <i>R.F. (MPa)</i>
AA	25,6±0,4	25,1±0,9	27,3±1,1	26,8±0,7	26,2 ±1,0
AB	24,1±0,2	22,6±1,2	25,2±0,8	24,9±1,0	24,2±1,2
AC	18,2±0,9	18,8±1,7	20,3±1,2	18,1±1,0	18,9±1,0

Nota: os lotes correspondem a diferentes fornadas, mas com ciclo térmico igual.

A análise dos resultados permite evidenciar que as diferenças da resistência à flexão entre os diferentes lotes, do mesmo abrasivo, não são significativas. No que diz respeito ao comportamento à flexão de cada abrasivo, observa-se que o abrasivo vitrificado AA apresenta maior resistência à flexão (26,2 MPa), enquanto que o AC apresenta menor resistência à flexão (18,9 MPa).

Após a concretização destes ensaios foram realizados outros de resistência à flexão a alta temperatura. Os resultados encontram-se identificados na tabela III.9.

Tabela III.9. Valores de resistência à flexão a alta temperatura dos abrasivos vitrificados.

Abrasivo vitrificado	Resistência à flexão <i>T= 400°C (MPa)</i>
AA	31,4±3,0
AB	27,9±1,0
AC	25,7±2,2

Os resultados continuam a demonstrar que o abrasivo vitrificado AA apresenta maior resistência à flexão à temperatura de 400°C (31,4 MPa) e o AC apresenta menor resistência à flexão à mesma temperatura (25,7 MPa).

c) Resistência à compressão

Na figura III.14 apresenta-se a fotografia de uma amostra usada neste ensaio, antes e após ensaio de compressão.



Figura III.14. Fotografia exemplificativa de uma amostra usada no ensaio de compressão.

Na tabela III.10 apresentam-se os resultados da resistência à compressão (R.C.) obtidos para os diferentes abrasivos vitrificados em diferentes lotes.

Tabela III.10. Valores de resistência à compressão dos abrasivos vitrificados (lotes diferentes)

<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>1º Lote R.C. (MPa)</i>	<i>2º Lote R.C. (MPa)</i>	<i>3º Lote R.C. (MPa)</i>	<i>4º Lote R.C. (MPa)</i>	<i>Média R.C. (MPa)</i>
AA	88,1±0,4	88,4±0,7	86,7±1,1	88,2±1,4	87,9±0,8
AB	88,1±0,7	86,0±0,9	85,6±0,6	86,8±0,9	86,6±1,1
AC	84,0±1,6	82,0±1,2	83,4±1,0	82,9±0,8	83,1±0,8

Nota: os lotes correspondem a diferentes semanas de cozedura mas sempre com o mesmo ciclo térmico.

Observa-se que a diferença entre os diferentes lotes, como no caso da resistência à flexão, também não é significativa. Em relação ao comportamento à compressão de cada abrasivo, é possível observar que o abrasivo vitrificado AA continua a apresentar maior resistência à compressão (87,9 MPa) e o AC menor resistência à compressão (83,1 MPa).

Comparando os resultados da resistência à compressão com os da resistência à flexão, é possível identificar a existência de uma relação linear entre eles (figura III.15).

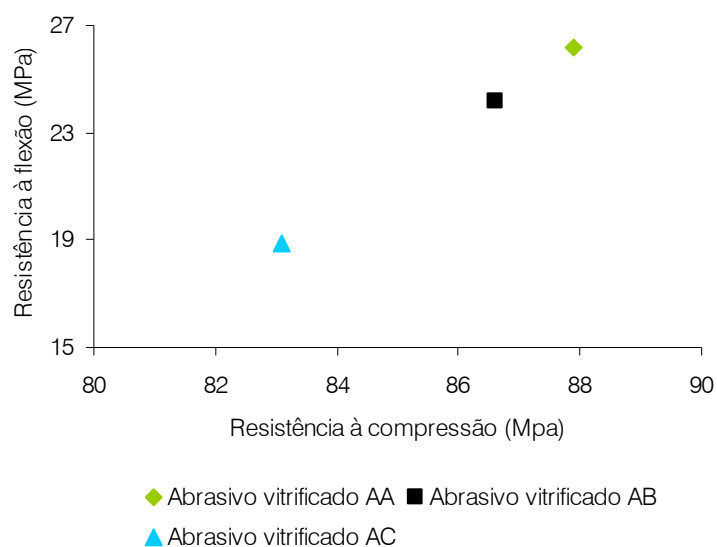


Figura III.15. Resistência à flexão em função da resistência à compressão para os diferentes abrasivos vitrificados.

d) Resistência ao choque térmico

Os resultados destes ensaios encontram-se identificados na tabela III.11 e III.12.

Tabela III.11. Valores da resistência à flexão após choque térmico dos abrasivos vitrificados (lotes diferentes).

<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>1º Lote R.F. (MPa)</i>	<i>2º Lote R.F. (MPa)</i>	<i>3º Lote R.F. (MPa)</i>	<i>4º Lote R.F. (MPa)</i>	<i>Média R.F. (MPa)</i>
AA	5,8±1,2	5,9±0,4	5,8±0,3	5,7±0,0	5,8±0,1
AB	4,9±0,0	5,3±1,0	5,4±0,1	5,6±0,9	5,3±0,3
AC	3,8±0,1	3,1±0,3	3,9±0,0	3,8±0,6	3,7±0,4

Tabela III.12. Valores da percentagem de resistência à flexão ($\Delta T = 580^\circ\text{C}$) dos abrasivos vitrificados.

<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>% Resistência à flexão $\Delta T = 580^\circ\text{C}$</i>
AA	22,1
AB	21,9
AC	19,3

Pode observar-se pela análise da tabela III.11, que o abrasivo vitrificado AA apresenta maior resistência à flexão após choque térmico (5,8 MPa), enquanto que o AC apresenta menor resistência à flexão após choque térmico (3,7 MPa).

Através da tabela III.12 pode concluir-se que o abrasivo vitrificado AA apresenta maior percentagem de resistência à flexão, ou seja, manifesta uma maior resistência ao choque térmico; o abrasivo vitrificado AC apresenta uma menor resistência ao choque térmico.

e) Módulo de Young

Para a realização destes ensaios utilizou-se o processo Grindo-Sonic, onde é determinada a frequência natural que é de seguida convertida em valores do módulo de Young (E). Estes valores são utilizados para avaliar a ligação grão abrasivo/ matriz vítrea e estimar qualitativamente a dureza da mó abrasiva.

Tabela III.13. Valores do módulo de Young dos abrasivos vitrificados.

<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>
AA	50,80
AB	47,65
AC	47,13

Os resultados demonstram que o abrasivo vitrificado AA apresenta a melhor ligação grão abrasivo/ matriz vítrea, apresentando qualitativamente uma maior dureza.

É de referir que não existem na bibliografia resultados de propriedades mecânicas para este tipo de materiais, encontrando-se apenas valores do módulo de Young para diferentes mós abrasivas vitrificadas [3] e valores de velocidade de ruptura [9, 25]

Comparando os resultados do módulo de Young, resistência ao choque térmico, resistência à compressão, resistência à flexão e velocidade de ruptura, é possível identificar a existência da esperada relação entre estes parâmetros, como se pode observar na tabela III.14, onde se apresenta um resumo das propriedades mecânicas medidas.

Tabela III.14. Valores das propriedades mecânicas dos abrasivos vitrificados.

<i>Abrasivo vitrificado</i>	<i>Vel. ruptura (m/s)</i>	<i>R.F. (MPa)</i>	<i>R.C. (MPa)</i>	<i>% R.F. $\Delta T = 580^{\circ}\text{C}$</i>	<i>Mód. Young (GPa)</i>
AA	108	26,2	87,9	22,1	50,80
AB	104	24,2	86,6	21,9	47,65
AC	93	18,9	83,1	19,3	47,13

Os ensaios mecânicos realizados aos abrasivos vitrificados evidenciaram, em primeiro lugar, que os valores de velocidade de ruptura realizados na fábrica são reprodutíveis, dado que existe uma relação linear entre estes e os valores de resistência à flexão e de resistência à compressão, como se pode observar pela figura III.16.

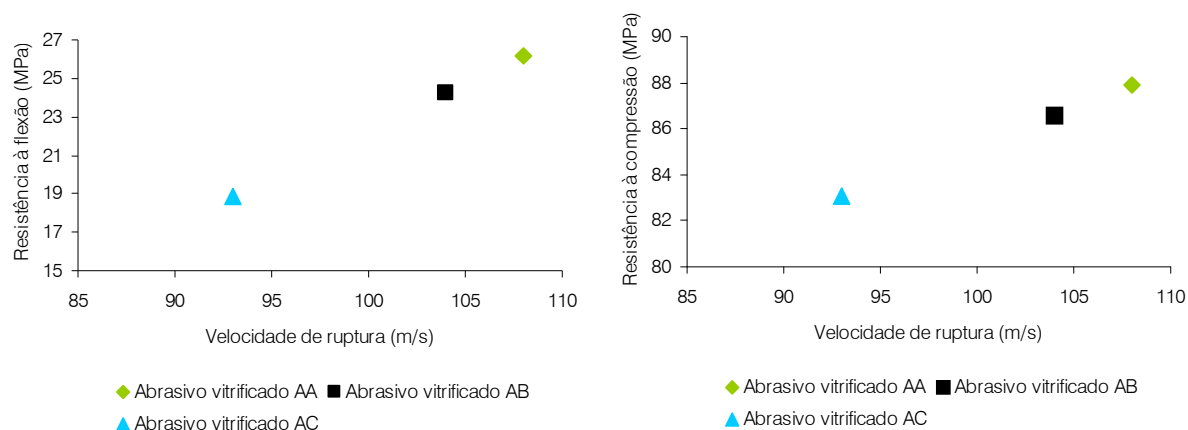


Figura III.16. Resistência à flexão e compressão em função da velocidade de ruptura para os diferentes abrasivos vitrificados.

Observa-se que o abrasivo vitrificado AA apresenta o melhor comportamento mecânico, enquanto que o AC apresenta um comportamento mecânico inferior. Os referidos comportamentos podem ser explicados à luz das microestruturas obtidas e da composição da matriz.

Comparando o abrasivo vitrificado AA e AB, pode observar-se que a matriz ligante do abrasivo vitrificado AA apresenta uma maior quantidade de frita. Esta, para além de diminuir a temperatura de fusão do sistema (formação de fase vítrea a temperatura mais baixa), promove a ligação grão abrasivo/ matriz ligante e aumenta a resistência mecânica da mó.

O abrasivo vitrificado AC apresenta menor resistência mecânica, uma vez que a quantidade de matriz ligante C, adicionada ao grão abrasivo, é insuficiente (9%). Observando o diagrama da figura III.10 verifica-se que o sistema é muito refractário.

As considerações anteriormente expostas vêm fundamentar os resultados dos ensaios mecânicos, ficando assim provado a razão pela qual o abrasivo vitrificado AA apresenta o melhor comportamento mecânico. A marcação dos pontos no diagrama de fases está em concordância com o anteriormente descrito.

Capítulo IV. Projecto de Novas Matrizes

Como referiram Jackson et al. [4] o desempenho das mós vitrificadas deve-se principalmente à composição da matriz vítrea. Neste capítulo e para o projecto de novas matrizes, com temperaturas de cozedura mais baixas e maior resistência mecânica, utilizou-se o diagrama de fases ternário $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$. Este foi utilizado para desenvolver novas formulações de matrizes vítreas a partir do estudo realizado anteriormente (Capítulo III).

Na figura IV.1 apresentam-se três novos pontos no diagrama ternário, tendo em consideração os seguintes factores:

- Matriz D: foi projectada no triângulo de compatibilidade $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (albite) – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (nefeline), desta forma, evita-se a formação do quartzo (diminui a resistência ao choque térmico);
- Matriz E: foi projectada no mesmo triângulo de compatibilidade da matriz D;
- Matriz F: foi projectada no mesmo triângulo de compatibilidade da matriz A: $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (albite), mas, neste caso, a temperatura final de fusão é mais baixa.

Para o desenvolvimento destas novas matrizes será necessário introduzir uma nova matéria-prima a fim de tornar o sistema menos refractário.

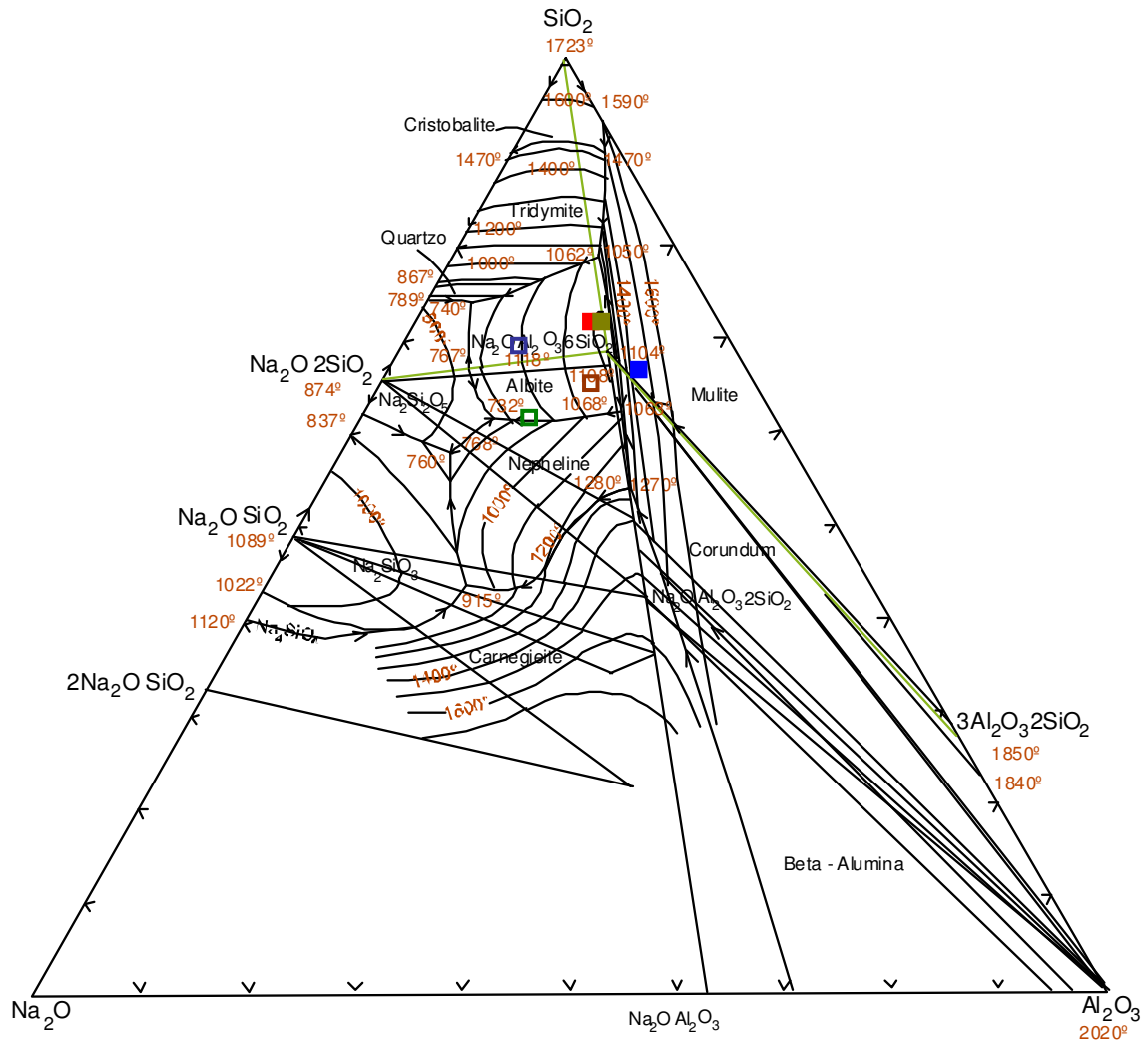
A escolha desta nova matéria-prima recai sobre a wollastonite. A wollastonite é um silicato de cálcio usado na indústria cerâmica. As suas funções são: baixar a temperatura de sinterização; minimizar a formação de gases; melhorar a resistência mecânica; melhorar a estabilidade dimensional. A tabela IV.1 apresenta a composição típica da wollastonite.

Tabela IV.1. Composição em óxidos (% peso) da wollastonite.

% Peso	Wollastonite
SiO_2	53,00
Al_2O_3	1,50
Na_2O	0,50
K_2O	
Fe_2O_3	0,50
MgO	1,00
CaO	43,50
Total	100

Após a escolha das matérias-primas desenharam-se as novas formulações de matrizes vítreas, tendo como base de cálculo uma folha de Excel, desenvolvida especialmente para este fim, como referido anteriormente.

As matrizes vítreas que serão desenvolvidas (para serem adicionadas aos grãos abrasivos de alumina) encontram-se situadas no diagrama de fases ternário da figura IV.1. Os pontos das matrizes A, B e C (convencionais) também estão identificados neste diagrama.



Legenda:

Matrizes vítreas comerciais:

- Matriz A
- Matriz B
- Matriz C

Matrizes vítreas (novas formulações):

- Matriz D
- Matriz E
- Matriz F

Figura IV.1. Sistema ternário SiO_2 - Al_2O_3 - Na_2O [24].

Na tabela IV.2 apresentam-se as percentagens em óxidos destas matrizes vítreas. Estes valores são lidos directamente do diagrama de fases ternário.

Tabela IV.2. Composição química (% peso) das novas matrizes vítreas.

% Peso	Matriz D	Matriz E	Matriz F
SiO ₂	63,59	66,98	71,14
Al ₂ O ₃	16,58	18,94	12,94
Óxidos fundentes	19,83	14,09	15,92
Total	100	100	100

As matrizes D e E pertencem ao triângulo de compatibilidade Na₂O 2SiO₂ – Na₂O Al₂O₃ 6SiO₂ – Na₂O Al₂O₃ 2SiO₂. A temperatura de início de fusão é de aproximadamente 732°C e a temperatura final de 900°C para a matriz D e de 1100°C para a matriz E. A matriz F pertence ao triângulo de compatibilidade SiO₂ – Na₂O 2SiO₂ – Na₂O Al₂O₃ 6SiO₂, neste caso a temperatura de início de fusão é de aproximadamente 740°C e a temperatura final de 900°C.

A matriz D e F pertencem a triângulos de compatibilidade diferentes mas apresentam, aproximadamente, a mesma temperatura final de fusão, com estas matrizes é possível diminuir a temperatura de sinterização. A matriz E apresenta, aproximadamente, a mesma temperatura final de fusão da matriz A, mas como se encontram em triângulos de compatibilidade diferentes será interessante observar quais as diferenças existentes.

Qualitativamente as matrizes que serão desenvolvidas distinguem-se por:

- Matriz D: aproximadamente 40 % de feldspato e o restante frita, caulino e wollastonite;
- Matriz E: aproximadamente 40 % de argila e o restante feldspato, frita e wollastonite;
- Matriz F: aproximadamente 50 % de frita e o restante feldspato e wollastonite.

Utilizando as novas formulações optimizadas, prevêem-se como principais ganhos, diminuir a temperatura de sinterização, aumentar a resistência mecânica e a vida útil das mós abrasivas.

Capítulo V. Conclusões

No presente capítulo descrevem-se as principais conclusões resultantes da análise dos resultados experimentais obtidos, bem como do projecto das novas matrizes. São apresentadas também algumas sugestões para futuros desenvolvimentos, que envolvem aspectos não focados e que podem contribuir para aprofundar o conhecimento da temática abordada.

1. Conclusões

Este trabalho de investigação consistiu no estudo de matrizes vítreas apropriadas para a aglomeração de grãos abrasivos de alumina. A caracterização das matrizes vítreas comerciais e o projecto de novas formulações de matrizes vítreas com temperaturas mais baixas de cozedura e com propriedades mecânicas acrescidas constituíram os principais objectivos definidos neste trabalho.

A caracterização química, microestrutural, térmica e mecânica das matrizes vítreas comerciais e respectivos compósitos abrasivos vitrificados já existentes foram primordiais para projectar as novas matrizes vítreas.

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que o abrasivo vitrificado AA apresenta o melhor comportamento mecânico, estando este correlacionado com a composição e quantidade de matriz ligante. A marcação dos pontos no diagrama ternário $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$ veio reforçar a conclusão anteriormente descrita, uma vez que a matriz A apresenta uma temperatura final de fusão mais baixa do que as outras matrizes (1100 °C). A frita reduz a temperatura de sinterização, promove a ligação grão abrasivo/ matriz vítrea e aumenta a resistência mecânica

Após estas conclusões salienta-se que o comportamento destes materiais está directamente relacionado com as matérias-primas que formam a matriz ligante e com as suas proporções relativas.

No que concerne ao projecto das novas matrizes foi necessário introduzir uma nova matéria-prima de forma a tornar o sistema menos refractário. Duas das novas matrizes vítreas (D, E) foram projectadas no triângulo de compatibilidade $\text{Na}_2\text{O} - 2\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 6\text{SiO}_2$. A matriz F foi projectada no triângulo de compatibilidade $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - 2\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 6\text{SiO}_2$. As matrizes D e F apresentam temperaturas finais de fusão mais baixas (aproximadamente 900°C), cumprindo com um dos objectivos principais do trabalho, isto é, diminuir a temperatura final de cozedura. A matriz E embora apresente uma temperatura final de fusão de aproximadamente 1100°C, em princípio irá apresentar melhores propriedades ao choque térmico do que as matrizes convencionais, uma vez que neste triângulo de compatibilidade se evita a formação de quartzo.

2. Trabalho futuro

Uma vez que a temática abordada neste trabalho não se esgotou e poderá ser alvo de futuros desenvolvimentos, apresentam-se alguns tópicos que se crêem válidos e que podem contribuir para preencher algumas lacunas nos conhecimentos actuais, relativamente aos materiais referidos.

Em primeiro lugar as novas formulações das matrizes vítreas têm de ser produzidas e testadas. Para além das características de friabilidade no corte, manutenção do perfil de corte por mais tempo e bom sistema de refrigeração, as novas formulações das matrizes vítreas para ferramentas abrasivas deverão enquadrar-se nas condições de processamento destes materiais. Após a optimização das formulações e condições de processamento ao nível laboratorial, deverão ser desenvolvidos protótipos com geometrias já definidas, cujo tempo de vida será testado em serviço nos clientes.

Bibliografia

- [1] G.C. Nussbaum, "Rebolos e Abrasivos, Tecnologia Básica, Volume 1", ed. Ícone Editora, São Paulo (Brasil), 1988
- [2] K. Przyklenk, "Diamond impregnated tools – uses and production", Industrial Diamond Review 4 (1993) 192-195
- [3] M.J.Jackson, B.Mills, "Thermal expansion of alumino-alkalisilicate and alumino-borosilicate glasses – comparison of empirical models", Journal of Materials Science Letters 16 (1997) 1264-1266
- [4] M.J.Jackson, B.Mills, "Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels", Journal of Materials Processing Technology 108 (2000) 114-124
- [5] M.J.Jackson, "Sintering and vitrification heat treatment of cBN grinding wheels", Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 232-234
- [6] K.-H. Lin, S.-F. Peng, S.-T. Lin, "Sintering parameters and wear performances of vitrified bond diamond grinding wheels", International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 25 (2007) 25-31
- [7] www.norton-abrasives.com (consultado em 2007)
- [8] Atlantic Schleifscheiben Honsteine – Catalog Abrasives
- [9] Krebs & Riedel Schleifscheibenfabrik – Catalog Abrasives
- [10] GE Superabrasives, Understanding the Vitreous Bonded Borazon CBN System, Application Development Operations
- [11] C. Gomes, J. Velho, C. Romariz, "Minerais Industriais", Portugal, 1998
- [12] S. Malkin, "Grinding Technology – Theory and Applications of Machining with Abrasives", ed. SME, USA, 1989

- [13] C. Gomes, “Minerais Industriais: Matérias Primas Cerâmicas”, ed. INIC, Portugal, 1990
- [14] E. Sánches, “Matérias-primas para a fabricação de fritas e esmaltes cerâmicos”, *Cerâmica Industrial* 2 (1997) 32-40
- [15] E. Dörre, H. Hübner, “Alumina – Processing, Properties, and Applications”, *Materials Research and Engineering*, ed. Springer-Verlag, Berlin, 1984
- [16] G.C. Nussbaum, “Rebolos e Abrasivos, Tecnologia Básica, Volume 2”, ed. Ícone Editora, São Paulo (Brasil), 1988
- [17] S. Okada, “Practical Application of the Sonic Testing to Determine the Grade of Grinding Wheels”, *Elektronika Voor Wetenschap en Industrie*
- [18] G.C. Nussbaum, “Rebolos e Abrasivos, Tecnologia Básica, Volume 3”, ed. Ícone Editora, São Paulo (Brasil), 1988
- [19] Norma ASTM C20-00 (2005), “Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water”
- [20] ASTM International, C 1161 – 02C (2003), “Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature”
- [21] A. Decneut, “New Formulas Improve E – Modulus Calculations”, *Centre de Recherches Scientifiques et Techniques de L’Industrie des Fabrications Metalliques*, 1947.
- [22] www.grindosonic.com (consultado em 2007)
- [23] A. Decneut, R. Aerens, “Controle Rapide de la Dureté des Meules” *Centre de Recherches Scientifiques et Techniques de L’Industrie des Fabrications Metalliques*, 1947
- [24] American Ceramic Society, “Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems”, *Ceramic Foundation*, 1960

[25] Grindo Sonic Device, "Checking Grinding Wheel Grade", Tool Engineering Developments

